

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

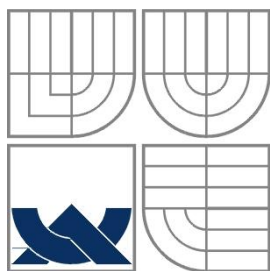
LABORATORNÍ ELEKTRONICKÁ ZÁTĚŽ S USB ROZHRANÍM

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

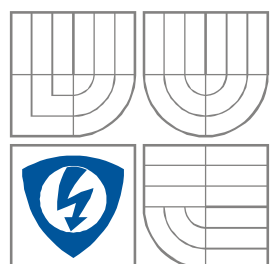
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. FRANTIŠEK NEPOR

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# LABORATORNÍ ELEKTRONICKÁ ZÁTĚŽ S USB ROZHRANÍM

LABORATORY REGULATED BALLAST WITH USB INTERFACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. FRANTIŠEK NEPOR

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. MILOSLAV STEINBAUER, Ph.D.

BRNO 2011

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou elektronicky regulovatelných zátěží, které se využívají při konstrukcích zdrojů, nabíječů, testech akumulátorů a v mnoha dalších aplikacích. V práci jsou probrány principy regulovatelných zátěží, a je v ní prozkoumána aktuální situace na trhu, používaná zapojení a dosahované vlastnosti zátěží.

Hlavní náplní práce má být vlastní návrh zapojení zátěže s mikroprocesorem, který je schopen komunikovat s PC prostřednictvím USB rozhraní a samozřejmě vytvoření obslužného programu. Završením celé práce je praktická realizace zařízení a ověření navržených parametrů.

## KLÍČOVÁ SLOVA

USB rozhraní, FTDI čip, elektronická zátěž, režim konstantního odporu, režim konstantního proudu, režim konstantního napětí, režim konstantního výkonu.

## ABSTRACT

This master's thesis is concerned about the laboratory regulated ballast with USB interface. This ballast is usually used to accumulator testing, pulsed power source loading and many other applications. In this work the principles of regulated electronic ballast are introduced, the obviously used circuitry is discussed as well as parameters of these ballast.

Main part of work will be in design and realization of uP-controlled ballast with USB interface, including software.

## KEYWORDS

USB Interface, FTDI chip, Laboratory regulated ballast, constant current mod, constant resistance mod, constant voltage mod, constant power mod

NEPOR, F. *Laboratorní elektronická zátěž s USB rozhraním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 74 s., 6 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Jako autor diplomové práce na téma „Laboratorní elektronická zátěž s USB rozhraním” dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Miloslavovi Steinbauerovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## Obsah

Obsah.....	4
Seznam obrázků .....	7
Seznam tabulek .....	9
Seznam tabulek .....	9
Úvod.....	10
1 Základní principy regulovatelných zátěží .....	11
1.1 Mechanické .....	11
1.1.1 Potenciometrové.....	11
1.1.2 Odporové dekády .....	12
1.2 Elektronické .....	12
1.2.1 Odporové dekády .....	12
1.2.2 Polovodičové.....	13
1.3 Možnosti využití.....	13
2 Dosahované vlastnosti elektronických zátěží na trhu .....	14
2.1 Základní druhy .....	14
2.2 Základní pracovní režimy.....	15
2.3 Možnost propojení s PC .....	15
2.4 Ochrana před poškozením.....	16
2.5 Dosahované parametry .....	16
3 Složitější konstrukce a jednotlivé prvky zátěží .....	17
3.1 Analogové zátěže .....	17
3.1.1 Základní zapojení .....	17
3.2 Zátěž řízená mikroprocesorem .....	18
3.2.1 Základní struktura .....	18
3.3 Základní konstrukční bloky zátěží s mikroprocesorem.....	19
3.3.1 Mikroprocesor .....	19
3.3.2 Ovládání .....	20
3.3.3 Displej .....	20
3.3.4 D/A, A/D převodník .....	20
3.3.5 Výstupní výkonový obvod .....	21
3.3.6 Napájení .....	21
3.3.7 Měření napětí, měření proudu .....	21
3.3.8 Budič výkonového prvku .....	21
3.3.9 Zdroje referenčního napětí .....	21
3.3.10 Systém chlazení.....	22
3.3.11 Systém proudové, přepět'ové a tepelné ochrany .....	22
3.3.12 Komparátor napětí.....	22
3.3.13 Generátor obdélníkového průběhu .....	22
3.4 USB rozhraní - vlastnosti a implementace do $\mu$ PC .....	22
3.4.1 USB (Universal Serial Bus) – vlastnosti .....	22
3.4.2 Implementace USB pomocí FTDI chipu.....	23
3.4.3 Softwarová implementace USB .....	24
3.4.4 Hardwarově integrováno v procesoru .....	24
4 Návrh schématu elektronické zátěže .....	25
4.1 Očekávané parametry zátěže .....	25
4.2 Blokový návrh zátěže .....	26
4.3 Analogová část .....	27

4.3.1	Hlavní regulační větev .....	27
4.3.2	Napětíová zpětná vazba .....	28
4.3.3	Proudová zpětná vazba .....	28
4.3.4	Napájení .....	29
4.4	Digitální část .....	29
4.4.1	Mikroprocesor .....	29
4.4.2	Displej .....	30
4.4.3	Ovládací prvky .....	30
4.4.4	Měření teploty a ventilátor .....	31
4.4.5	Komunikace s USB .....	31
5	Simulace klíčových částí analogové konstrukce .....	32
5.1	Režim konstantního proudu .....	32
5.1.1	Schéma simulace .....	32
5.1.2	Skoková změna řídicího napětí $V_{IN}$ a kapacity $C1$ .....	33
5.1.3	Skoková změna napětí na zatěžovaném zdroji .....	33
5.1.4	Pomalá změna napětí na zatěžované zdroji .....	34
5.1.5	Přenosové charakteristiky proudu zdroje na vstupním napětí $V_{IN}$ .....	34
5.2	Režim konstantního napětí .....	35
5.2.1	Schéma simulace .....	35
5.2.2	Skoková změna řídicího napětí $V_{IN}$ a kapacity $C1$ .....	36
5.2.3	Skoková změna napětí na zatěžovaném zdroji .....	36
5.2.4	Vliv pomalé změny napětí na zatěžovaném zdroji .....	36
5.2.5	Přenosové charakteristiky napětí zdroje na vstupním napětí $V_{IN}$ .....	37
5.3	Režim konstantního odporu .....	38
5.3.1	Schéma simulace .....	38
5.3.2	Vliv skokové změny napětí na straně zátěže .....	38
5.3.3	Vliv nastavení potenciometru na výstupním odporu .....	39
5.3.4	Pomalá změna napětí na zatěžovaném zdroji .....	39
5.4	Shrnutí výsledků simulace .....	41
6	Realizace konstrukce .....	42
6.1	DPS .....	42
6.1.1	Procesorová DPS .....	42
6.1.2	Výkonová DPS .....	43
6.1.3	Napájecí DPS .....	44
6.2	Konstrukce .....	45
6.2.1	Přední panel .....	45
6.2.2	Zadní panel .....	46
6.2.3	Vnitřní uspořádání přístroje .....	46
6.2.4	Celková hotová konstrukce .....	48
6.3	Firmware .....	49
6.3.1	Celková skladba programu .....	49
6.3.2	Vybrané algoritmy .....	50
6.3.3	Výpočty pro měření a nastavování zátěže .....	52
6.3.4	Nastavení FT232R .....	54
6.3.5	Manuální ovládání přístroje .....	54
6.4	Aplikace pro OS Windows .....	56
6.4.1	Vzhled a struktura programu .....	56
6.4.2	Ovládání aplikace .....	57
7	Měření a srovnání parametrů zátěže .....	58
7.1	Režim konstantního proudu .....	59

7.2	Režim konstantního napětí .....	60
7.3	Režim konstantního odporu .....	62
7.4	Srovnání měření se simulací .....	62
Závěr	.....	63
Použitá literatura	.....	64
Seznam použitých zkratk veličin a symbolů .....		66
Seznam příloh.....		67



## Seznam obrázků

Obr. 1 Reostat [17] .....	11
Obr. 2 Zapojení potenciometrické zátěže .....	11
Obr. 3 Zapojení dekád - princip .....	12
Obr. 4 Principiální schéma elektronické zátěže .....	13
Obr. 5 Princip elektronické zátěže – společné napájení [11] .....	13
Obr. 6: Ilustrační obrázky vyráběných zátěží [8], [9] .....	14
Obr. 7 Elektronická analogová zátěž - schéma [16] .....	18
Obr. 8 Elektronická zátěž - blokové schéma [2] .....	19
Obr. 9 FTDI chip [10] .....	23
Obr. 10 Připojení USB rozhraní k procesoru – softwarová implementace [12] .....	24
Obr. 11 Elektronická zátěž - blokové schéma (návrh) .....	26
Obr. 12 Hlavní regulační větev .....	27
Obr. 13 Měření napětí, zpětná vazba .....	28
Obr. 14 Měření proudu, zpětná vazba .....	28
Obr. 15 Napájecí zdroj .....	29
Obr. 16 LCD displej .....	30
Obr. 17 Fóliová klávesnice .....	30
Obr. 18 Připojení k USB .....	31
Obr. 19 Simulační schéma režimu proudu .....	32
Obr. 20 Závislost skokové změny napětí na ustálení výstupního proudu .....	33
Obr. 21 Skoková změna napětí zatěžovaného zdroje .....	33
Obr. 22 Vliv pomalé změny napětí zatěžovaného zdroje na nastaveném proudu .....	34
Obr. 23 Přenosová charakteristika $I=f(V_{IN})$ pro rozsah 11.5A .....	34
Obr. 24 Přenosová charakteristika $I=f(V_{IN})$ pro rozsah 1A .....	35
Obr. 25 Simulační schéma režimu konstantního napětí .....	35
Obr. 26 Závislost skokové změny napětí $V_{IN}$ na ustálení výstupního napětí .....	36
Obr. 27 Skoková změna napětí zatěžovaného zdroje .....	36
Obr. 28 Vliv pomalé změny napětí zatěžovaného zdroje na nastaveném napětí zátěže .....	37
Obr. 29 Přenosová charakteristika $U_{ZDROJ}=f(V_{IN})$ , rozsah 40V .....	37
Obr. 30 Přenosová charakteristika $U_{ZDROJ}=f(V_{IN})$ , rozsah 10V .....	37
Obr. 31 Simulační schéma režimu konstantního odporu .....	38
Obr. 32 Vliv skokové změny napětí zatěžovaného zdroje na nastavený odpor zátěže .....	38
Obr. 33 Vliv nastavení potenciometru na výstupním odporu zátěže .....	39
Obr. 34 Závislost odporu zátěže na nastavení potenciometru .....	39
Obr. 35 Závislost nastaveného odporu na napětí zdroje, rozsah 10A/40V .....	40
Obr. 36 Závislost nastaveného odporu na napětí zdroje, rozsah 1A/40V .....	40
Obr. 37 Závislost nastaveného odporu na napětí zdroje, rozsah 1A/10V .....	40
Obr. 38 Závislost nastaveného odporu na napětí zdroje, rozsah 10A /10V .....	41
Obr. 39 Procesorová DPS – spoje (vlevo pohled z vrchu, vpravo pohled zespodu) .....	42
Obr. 40 Procesorová DPS – osazovací plán (vlevo pohled z vrchu, vpravo pohled zespodu) .....	42
Obr. 41 Procesorová DPS – osazená deska .....	43
Obr. 42 Výkonová DPS – spoje (vlevo pohled z vrchu, vpravo pohled zespodu) .....	43
Obr. 43 Výkonová DPS - osazovací plán .....	44
Obr. 44 Výkonová DPS – osazená deska .....	44
Obr. 45 Napájecí DPS – pohled zespodu a osazovací plán .....	44
Obr. 46 Napájecí DPS – osazená deska .....	45
Obr. 47 Hotový přední panel .....	45
Obr. 48 Zátěž – vnitřní uspořádání (pohled zezadu) .....	46

Obr. 49 Zátěž – výkonová deska a upevnění tranzistorů .....	47
Obr. 50 Zátěž – vnitřní uspořádání (pohled zepředu) .....	47
Obr. 51 Zátěž – Pohled zepředu na hotový přístroj.....	48
Obr. 52 Zátěž – Pohled zezadu na hotový přístroj .....	48
Obr. 53 Názorný vývojový diagram firmwaru celé zátěže .....	50
Obr. 54 Vývojový diagram příjmu dat z PC .....	50
Obr. 55 Hlídaní maximálního proudu .....	51
Obr. 56 Hlídaní a měření teploty.....	51
Obr. 57 Obsluha AD převodníku (Měření U, I, Uext) .....	52
Obr. 58 Program FT Prog.....	54
Obr. 59 Hlavní menu (vlevo) a menu režimu (vpravo).....	55
Obr. 60 Režim měření napětí (vlevo) a podmenu režimu napětí .....	55
Obr. 61 Kalibrace – menu(vlevo) a nastavování kalibrace (vpravo) .....	55
Obr. 62 Podmenu zvolené kalibrace .....	56
Obr. 63 Hlavní okno programu .....	56
Obr. 64 Obsluha zmáčknutí tlačítka (vlevo) a časovače (vpravo) .....	57
Obr. 65 Blok průběhu měření.....	57
Obr. 66 Kalibrace přístroje.....	58
Obr. 67 Měření parametrů zátěže - pracoviště .....	58
Obr. 68 Schéma zapojení měření .....	59
Obr. 69 Vliv změny napětí zdroje na udržení konstantní hodnoty proudu .....	59
Obr. 70 Vliv změny napětí zdroje na napětí za srážecím odporem.....	59
Obr. 71 Rušení v režimu konstantního proudu .....	60
Obr. 72 Přenosová charakteristika $U_{v,m}=f(U_n)$ .....	60
Obr. 73 Přenosová charakteristika $I=f(U_n)$ .....	61
Obr. 74 Vliv změny napětí zdroje na vstupní parametry zátěže .....	61
Obr. 75 Test stability při skokové změně nastavovacího napětí .....	61
Obr. 76 Vliv změny napětí zdroje na nastavenou hodnotu odporu.....	62
Obr. 77 Nežádoucí kmitání na proudovém výstupu.....	62

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti AC zátěží.....	16
Tabulka 2: Vlastnosti DC zátěží.....	16
Tabulka 3: Parametry zátěže získané simulací.....	41
Tabulka 4: Seznam součástek .....	6

## Úvod

Elektronická zátěž je zařízení používané především při konstrukcích a testování napětových nebo proudových zdrojů a objevuje se v mnoha podobách a praktických použitích. Toto zařízení vykazuje vůči zdroji jistý odpor, který lze v určitém konečném rozmezí nastavit ovládacími prvky, nebo i pomocí PC, komunikujícího se zátěží prostřednictvím různých rozhraní (USB, RS232,...). Propojení s PC sebou přináší spoustu výhod a možností jako např. vykreslení vybíjecí charakteristiky baterií, možnost exportovat data do aplikace Excel a mnoho jiných.

Za první regulovatelnou zátěž se dá považovat odporová dekáda, kde nastavujeme požadovaný odpor přepínáním a sériovým nebo paralelním spojováním rezistorů. Toto řešení je velmi jednoduché, ale pro vyšší výkony by taková zařízení byla asi příliš rozměrná, hodně těžká a finančně náročná. Druhým řešením je použití různých potenciometrů (drátových pro vyšší výkony a vrstvových pro zanedbatelné výkony). Nevýhodou těchto mechanických zařízení je, že se časem mohou velmi opotřebovat. Navíc většinou potřebujeme znát také proud tekoucí zátěží nebo úbytek napětí na této zátěži. Toho lze docílit připojením dalších příslušných měřicích přístrojů.

Nové moderní zátěže využívají jako zátěž polovodičové prvky bipolární nebo unipolární tranzistory. U velmi jednoduchých zátěží budeme k jejich nastavení potřebovat další měřicí přístroje. Ty finančně náročnější už mají potřebné prvky k nastavení požadovaného odporu integrovány přímo v sobě a mohou pracovat v různých režimech (konstantní napětí, konstantní proud, odpor a výkon). Navíc jsou schopny z naměřených hodnot spočítat i různé vlastnosti zdrojů. O tohle vše se stará mikroprocesorová jednotka, která kontroluje, měří, počítá a nastavuje požadovaná data. Velikou výhodou je i možnost propojení se stolním PC a grafickou prezentací dat. Cena elektronických zátěží je určena především přesností měření nastavení základních veličin přístrojů a nabídkou funkcí. Výhodou nejmodernějších systémů je to, že program, který řídí veškeré operace tohoto zařízení, lze kdykoliv aktualizovat a tak případně rozšířit možnosti či opravit nedostatky přístroje.

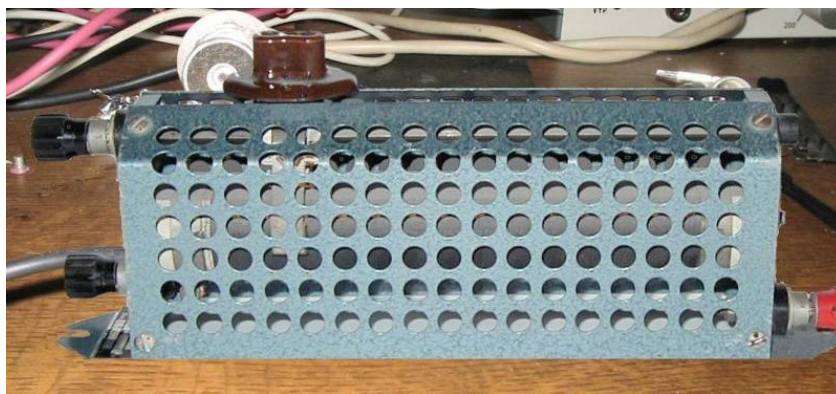
# 1 Základní principy regulovatelných zátěží

Způsobů, jak realizovat regulovatelnou zátěž, je několik. Z počátku bylo možným řešením využití potenciometrů, nebo přepínáním a sériovým (v principu i paralelním) spojováním odporů. Takovéto zátěže můžeme řadit mezi mechanické. Nové zátěže jsou založeny na regulaci proudu nebo úbytku napětí na polovodiči. Jako aktivní prvek se zde využívá bipolární nebo unipolární tranzistor.

## 1.1 Mechanické

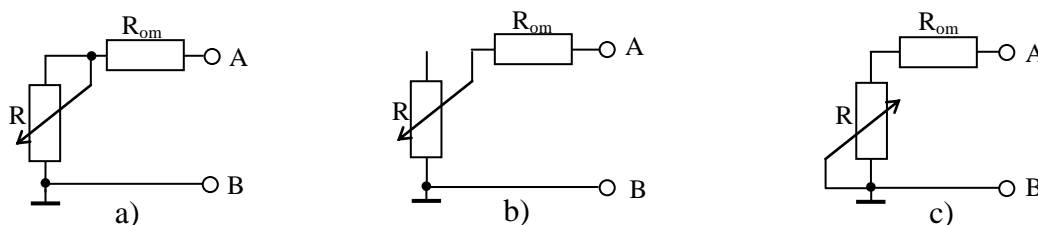
### 1.1.1 Potenciometrové

Potenciometrové zátěže se v praxi vyskytují převážně jen pro malé výkony řádově v mW a lze se s nimi setkat v mnoha aplikacích a to převážně ve zvukové technice, ale zde fungují spíše jako děliče napětí.



Obr. 1 Reostat [17]

Pro vyšší výkony musí být realizovány drátovým nastavitelným rezistorem zvaným reostat (obr. 1). Ten je realizován jako drátový odporník navinutý na izolační podložce a požadovaný odpor se nastavuje pojížděným jezdcem. Toto řešení je docela rozměrné, neboť musí být vyřešena otázka chlazení a navíc se zvyšující teplotou odporového drátu se mění také jeho odpor. Na obr. 2 vidíme tři možnosti zapojení tohoto prvku. Zapojení a) a c) jsou naprosto totožné a mají výhodu v tom, že při posouvání jezdcem, se příliš neprojeví krátkodobý výpadek dotyku jezdcem o aktivní odporovou plochu a maximální odpor bude omezen na hodnotu  $R$ . To neplatí pro obrázek b). V něm je maximální odpor při odsinku jezdcem roven nekonečnu.



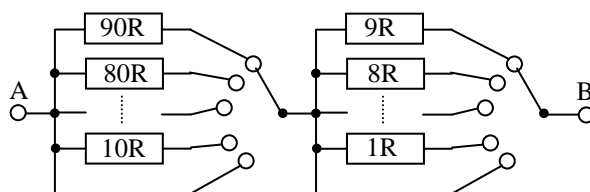
Obr. 2 Zapojení potenciometrické zátěže

V zapojení ještě vidíme druhý rezistor  $R_{om}$ , který v případě výkonového zdroje omezuje proud tekoucí potenciometrem (reostatem). Pokud by proud byl příliš vysoký, dotykové plochy jezdcem by se rozžhavyly a poškodily by odporovou vrstvu. Tento odpor tedy omezuje maximální výkon, který do nastavitelného rezistoru můžeme přivést.

Reostaty se v současné době téměř nepoužívají, nahradily je nové polovodičové prvky, které mají menší rozměry a lepší variabilitu ovládání. Setkat se s těmito prvky ještě můžeme v laboratořích a v historických strojích (historických tramvajích,...). Velkou předností této součástky je nízká cena.

### 1.1.2 Odporové dekády

Odporové dekády jsou další formou regulovatelných zátěží. Jak vidíme na obr. 3, skládají se z několika sad (dekád) rezistorů, které se vzájemně sériově (nebo paralelně) spojují a lze z nich poskládat velikost odporu 0 až  $99\Omega$  (platí pro obr. 3). Toto zařízení má velké možnosti využití. Opět může sloužit účelům laboratorním při měření vstupních odporů (například srovnávací metodou) nebo jiných veličin.



Obr. 3 Zapojení dekád - princip

Použití odporové dekády jako zátěžového prvku je v praxi využitelné, ale opět jen do určité míry. Největším problémem je výkonové omezení. Toto zařízení se dá použít pro zdroje s velmi malými proudy řádově stovky mA ve zkratu. Samozřejmě že záleží na tom, jak velký je nastavený odpor dekády a jak velké je napětí zdroje. Pokud bychom se pohybovali v malých hodnotách odporu dekády a měli bychom dostatečně velké napětí na to, abychom překročili maximální výkonovou ztrátu jednoho rezistoru, došlo by k jeho poškození. Na druhou stranu pokud bychom chtěli vyrobit odporovou dekádu, která by vydržela velké výkonové namáhání, dostali bychom příliš velké rozměry a hmotnost. Takovéto zátěže se používají, ale mají nastavitelný odpor jen v určitých mezích. Mají například jen 10 rezistorů a většinou se zapojují jen paralelně k sobě anebo jednotlivě. Systém chlazení může být velmi masivní, záleží na velikosti povolené výkonové ztráty přístroje.

Z hlediska možnosti nastavení velikosti odporu má lepší vlastnosti již výše zmíněný reostat. Odporové dekády se především využívají pro kalibrační a měřicí účely s malým výkonem.

## 1.2 Elektronické

Nástupem polovodičových materiálů a rychlou miniaturizací součástek docházelo k velmi rychlé modernizaci starých a vývoji nových zařízení. Těmto inovacím neunikly ani regulovatelné odporové zátěže. Objevily se nové možnosti jak regulovat výkon, ale zůstaly i původní principy, ve kterých přibýly moderní součástky.

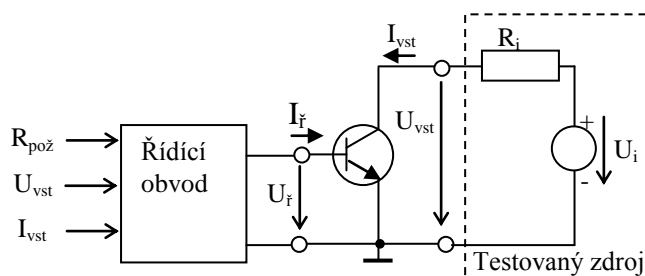
### 1.2.1 Odporové dekády

Tato zařízení zůstala v principu stejná, pouze v nich přibýly dalších elektronické součástky a změnil se i způsob nastavování odporu. Odpor jako samotný zde zůstal realizován velmi přesným a stabilním rezistorem. Změna odporu se provádí opět sériovou (nebo paralelní) kombinací rezistorů. Propojování se zde však neděje pomocí přepínače, ale pomocí soustavy relé. Zapínání relé obsluhuje mikroprocesor a technik nastavuje pouze odpor přímo v číselné hodnotě na klávesnici, nebo zvolí některý naprogramovaný simulační program (např. odporového teplotního čidla). Tato zařízení se používají pouze ke kalibračním nebo k simulování některých teplotních, světelných, tlakových či jiných čidel. Jejich nastavitelný

odpor se pohybuje přibližně od jednotek  $\Omega$  až do jednotek  $G\Omega$ . Pro výkonové aplikace by byla realizace takového přístroje nesmírně nákladná, ale pro velmi diskrétní hodnoty nastavení odporu (např. 10 hodnot) by realizovatelná byla.

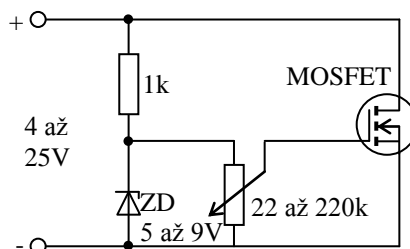
### 1.2.2 Polovodičové

Konstrukce elektronických zátěží, které jsou založeny na změnách proudu procházejícího polovodičovým prvkem, může být ekonomicky výhodná a široce využitelnou variantou. Jsou k dostání na trhu od různých výrobců, v různých podobách a výkonových zatíženích. Tyto zátěže pro nastavení odporu využívají buď bipolárních, nebo unipolárních tranzistorů.



Obr. 4 Principiální schéma elektronické zátěže

Pro základní ilustraci principu byl zvolen bipolární NPN tranzistor. Použití jiného typu prvku by změnilo způsob ovládání tranzistoru. Na obr. 4 vidíme, že základními prvky elektronické zátěže jsou řídicí obvod a tranzistor. Vstupními parametry řídicího obvodu mohou být požadovaná hodnota odporu, vstupní napětí  $U_{vst}$  a proud  $I_{vst}$ . Pokud jsme například v módu konstantního proudu, řídicí obvod reaguje pouze na změny proudu  $I_{vst}$ . Porovnává velikost požadovaného proudu a  $I_{vst}$  a dorovnáva odchylku změnou  $I_f$ . U ostatních módu to je podobné.



Obr. 5 Princip elektronické zátěže – společné napájení [11]

Funkční provedení těchto zátěží může být rozmanité. Mohou být řízeny celé analogově nebo digitálně použitím mikroprocesorové jednotky, což přináší řadu výhod, ale větší složitost. Napájení může být provedeno jak jednotlivě (řídicí a zatěžovací část zvlášť) nebo dohromady ze zkoumaného zdroje viz obr. 5. Zde je ovšem problém, že jsme omezeni zdola minimálním napětím, při kterém ještě dobře funguje řídicí část. Pro řízení mikroprocesorem je tento druh napájení nepoužitelný.

I u odděleného napájení jsme omezeni minimální velikostí napětí tranzistoru  $U_{CE}$  (bipolární tranzistor), aby obvod fungoval správně. To se zde pohybuje kolem 1V. U unipolárních tranzistorů je situace výhodnější, protože je limituje jen minimální odpor  $R_{DS}$  mezi svorkami DRAIN a SOURCE.

## 1.3 Možnosti využití

Možností využití takových přístrojů může být mnoho. Své uplatnění si našly především v odvětví, zabývající se konstrukcí a výrobou napájecích zdrojů a dále v testovacích odvětvích, ale i ve výkonových aplikacích. Možnost využití zátěže závisí především na její

vybavenosti a mezních parametrech, které mohou být vzájemně velmi odlišné. Výrazný průlom přinesly zátěže řízené mikroprocesorem. Ten umožňuje už zvolit některý z již naprogramovaných testovacích programů pro test zdrojů a baterií. Navíc přístroj je sám schopen vyhodnotit mnoho parametrů a ty po skončení měření předat uživateli. Elektronická zátěž může být využita v následujících aplikacích:

- Vyhodnocování AC/DC adaptérů
- Měření kapacity baterií
- Výkonové vyhodnocení DC/DC konvertorů
- Pulzní vybíjení baterií konstantním výkonem
- Testování nabíječek pro mobilní telefony
- Testování a vývoj spínaných zdrojů
- Měření základních parametrů zdrojů
- Testování ochran napájecích zdrojů
- Testování elektromotorů,...

Zde jsou uvedeny jen základní uplatnění elektronických zátěží. Jejich praktické využití může být mnohem větší.

## 2 Dosahované vlastnosti elektronických zátěží na trhu

Elektronické zátěže jsou k dostání na trhu v nejrůznějších podobách (obr. 6) a softwarových vybaveních. Firem, které tento výrobek dodávají, je mnoho, ale z funkčního hlediska nabízejí všechny totéž, jen s drobnými úpravami a vylepšeními. Mezi přední výrobce, které tento produkt dodávají, patří např. firmy Agilent, Kikusui, Meatest a další.



Obr. 6: Ilustrační obrázky vyráběných zátěží [8], [9]

### 2.1 Základní druhy

V základu můžeme zátěže dělit na **stejnoseměrné** a **střídavé**. Stejnoseměrné zátěže jsou v konstrukci oproti střídavým značně jednodušší, protože nepotřebují žádné usměrňovače pro měření napětí a proudu a vystačí si pouze s jedním výkonovým tranzistorem. U střídavých zátěží se musí řešit problém změny polarity napětí na tranzistoru a to formou různých antiparalelních zapojení. Střídavé zátěže pracují od větších napětí (od 30V~ a výš), neboť u malých amplitud napětí vniká vlivem nelinearit usměrňovacích prvků velké zkreslení vstupního signálu.



## 2.2 Základní pracovní režimy

Zátěže, které jsou dodávány na trhu, umožňují několik režimů funkce, podle toho jakým způsobem chceme testovat zdroj. Mezi čtyři základní režimy, kterými jsou elektronické zátěže vybaveny, řadíme tyto:

- Režim konstantního odporu
- Režim konstantního proudu
- Režim konstantního napětí
- Režim konstantního výkonu

Jinak řečeno, zařízení umožňují nastavit požadovanou veličinu  $R$ ,  $U$ ,  $I$  a  $P$  podle přání obsluhy a podle možnosti mezních parametrů zařízení. Všechny tyto režimy nemusí být u všech zátěží podporovány. Hlavním režimem, kterým je vybaveno každé zařízení tohoto druhu, je konstantní odpor.

Dražší typy mohou mít navíc testovací režimy ještě rozšířeny o tzv. **Automatické testování**, kdy je v přístroji uložen program, který provádí testování podle určitého postupu (měření kapacity akumulátoru, měření zátěžové charakteristiky zdroje,...). Některé přístroje mají na výběr až z deseti programů.

Dalším režimem, ve kterém mohou zátěže pracovat, je **paralelní režim**. V něm je vzájemně paralelně propojeno více zátěží. Tímto způsobem zvýšíme maximální vstupní výkon a to tolikrát, kolik zátěží je paralelně k sobě připojeno. Ovšem daná zařízení to musí podporovat. Samotné řízení všech připojených zátěží je realizováno pomocí externího vstupu, který může být digitální nebo analogový.

Další vstup, kterým zátěže mohou disponovat, je vstup pro připojení externího generátoru. Tento vstup je napojen na řídicí obvod a s danou frekvencí generátoru zapíná a vypíná zátěž. Teoreticky ji také může měnit podle velikosti napětí na vstupu. Můžeme řídit sinusovým, trojúhelníkovým signálem, ale používá se obdélník (zapnuto/ vypnuto). Většinou je generátor zabudován přímo v zařízení. Tento režim se nazývá **dynamický režim** zátěže.

## 2.3 Možnost propojení s PC

Spousta těchto moderních přístrojů umožňuje propojení s PC a předávání dat do speciálních uživatelských programů, jakými jsou přímo aplikace pro daný výrobek (dodává výrobce), nebo např. tabulkový procesor EXCEL či automatické ovládání pomocí aplikace VEE. Toto propojení může ušetřit obsluze hodně času, neboť program sám provede požadované úkony a uloží či zobrazí požadované hodnoty. Pro propojení PC s elektronickými zátěžemi se používají především tato rozhraní:

- RS232
- RS485
- IEEE488 (GPIB)
- USB

Tato rozhraní jsou v elektrotechnice velmi dobře známá a není je potřeba nějak zvlášť komentovat. Poslední dobou se v měřicí technice rozmáhá připojení k PC pomocí Ethernetu a to prostřednictvím malého webového serveru, který komunikuje s procesorovou jednotkou pomocí příslušných rozhraních (např. UART, SPI,...). Výhodou tohoto propojení je možnost sledování stavu a průběhu chodu na velké vzdálenosti. Například o několik místností dál, pokud ovšem v dané místnosti je internetová přípojka. Dále je možno se o tomto způsobu propojení dozvědět v literatuře [13].

## 2.4 Ochrana před poškozením

Ochrana před poškozením přístrojů, ale i ohrožením lidských životů není v elektronice ničím výjimečným a je každopádně tvrdě vyžadována. U elektronických zátěží, kde se pracuje s velmi vysokými výkony, hrozí obzvláště nebezpečí požáru z výkonových obvodů, kdy se buď velmi zahřeje chladič těchto prvků, nebo dojde k přetížení testovaného zařízení. Dalším kritériem je ochrana připojených dalších zařízení, jako je například PC, proti možnému vniku nebezpečného napětí. Pro tyto přístroje se tedy používají čtyři základní ochrany:

- Nadproudová
- Přepětíová
- Galvanickým oddělením
- Tepelná

Všechny zátěže nemusí být vybaveny všemi těmito ochranami, ale první ochranu mívají téměř všechny. Drahé a špičkové přístroje mívají i všechny čtyři ochrany.

## 2.5 Dosahované parametry

Parametry, které zde budou uvedeny, jsou extrémní a nemusí je splňovat všechny zátěže. Mohou být obecně různé a jsou zde uvedeny především mezní hodnoty použitelnosti přístrojů, které jsou vyráběny a byly dohledány. Vysoké hodnoty jsou především pro speciální použití.

**Tabulka 1: Vlastnosti AC zátěží**

Parametr	min	max
Vstupní napětí $U_{\text{vst}}$ [V]	50	350
Vstupní odpor $R_{\text{vst}}$ [ $\Omega$ ]	2,5	1000
Vstupní proud $I_{\text{vst}}$ [ $A_{\text{rms}}$ ]	0	45
Vstupní výkon $P_{\text{vst}}$ [kW] <sup>*1)</sup>	0	3.5
Vstupní frekvence $f_{\text{vst}}$ [Hz] <sup>*2)</sup>	45	70
Přesnost měření proudu [A]	0.1% + 0.1% z rozsahu	
Přesnost měření napětí [V]	0.1% + 0.2% z rozsahu	

\*1) Zátěže s vysokým výkonem jsou spíše pro speciální případy. Běžné přístroje mívají výkon kolem 500W což pro běžné využití úplně stačí.

\*2) Předpokládá se harmonický průběh

**Tabulka 2: Vlastnosti DC zátěží**

Parametr	min	max
Vstupní napětí $U_{\text{vst}}$ [V]	0,8	500
Vstupní odpor $R_{\text{vst}}$ [ $\Omega$ ]	45,55m	25k
Vstupní proud $I_{\text{vst}}$ [A]	0	10k
Vstupní výkon $P_{\text{vst}}$ [kW] <sup>*1)</sup>	0	15.6
Dynamická zátěž $f$ [kHz]	-	20
Přesnost měření proudu [A]	0.1% + 0.1% z rozsahu	
Přesnost měření napětí [V]	0.1% + 0.2% z rozsahu	
Přesnost nastavení odporu [ $\Omega$ ]	$\pm(0,5\% \text{ of set}^{*2}) + 0,5\% \text{ of f.s}^{*3})$	
Přesnost nastavení výkonu [W]	$\pm(0,6\% \text{ of set} + 1,4\% \text{ of f.s})$	

\*1) Zátěže s vysokým výkonem jsou spíše pro speciální případy. běžné přístroje mívají výkon kolem 500W což pro běžné využití úplně stačí.

\*2) z nastavení

\*3) z plného rozsahu

### 3 Složitější konstrukce a jednotlivé prvky zátěží

#### 3.1 Analogové zátěže

##### 3.1.1 Základní zapojení

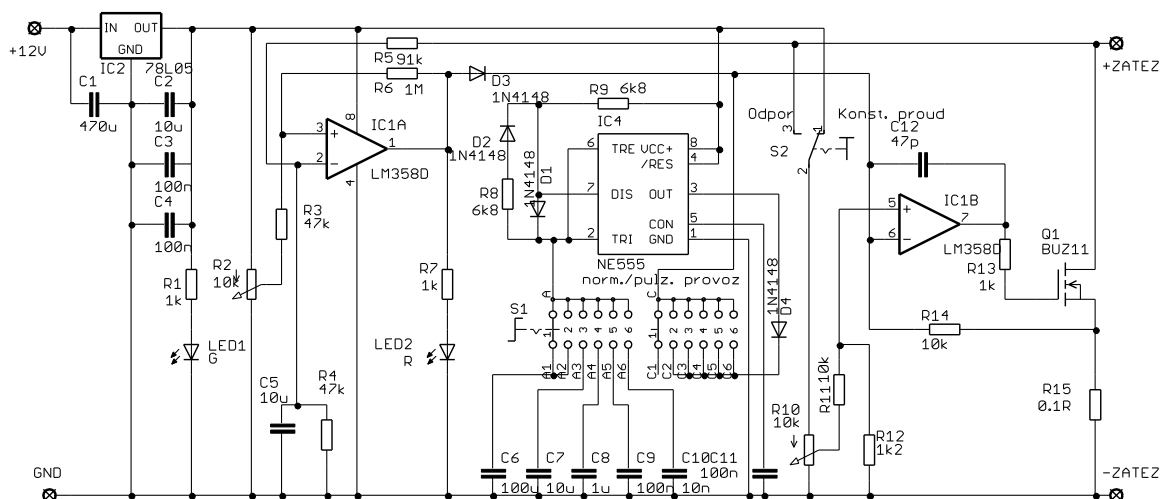
Zapojení jednoduchých zátěží, které si lze postavit takřka na „koleně“, je na internetu k zhlédnutí mnoho (např. obr. 5). Tyto konstrukce mají velkou nevýhodu v tom, že je lze použít pouze na jeden účel a většinou mají jen samostatný režim konstantního proudu nebo odporu. K tomu, aby mohl být přístroj víceúčelový, musí být konstrukce složitější a dobře promyšlená. Většinou se vychází z již z nějaké známé konstrukce, která se doplní o další funkce, nebo se vylepší starší konstrukce lepším zapojením s využitím moderních součástek.

První složitější konstrukce, kterou se zde budeme zabývat a která byla nalezena na internetových stránkách [16], je zcela analogová. Jedná se o amatérský návrh, pravděpodobně úprava některé jiné verze konstrukce. Její schéma můžeme vidět na obr. 7. Je sestavena ze sedmi základních bloků – zdroj, měření proudu, měření napětí, komparátor napětí, generátor pro dynamický režim, budič výkonové části a výkonový prvek. Lze si zvolit mezi dvěma režimy - režim konstantního proudu nebo konstantního odporu.

Jako výkonový prvek je použit výkonový tranzistor MOSFET typu N. Ten musí být z důvodu vysokých výkonových ztrát umístěn na masivním chladiči. Tento prvek vydrží proud o velikosti 30 A a napětí na vstupních svorkách DS až 50 V. Maximální výkon, kterým lze obvod zatížit, je 75 W a tuto hodnotu bychom nastavením daného odporu a proudu neměli přesáhnout. Pro udávané parametry této zátěže 10 A a 50 V může nastat, že se povolený výkon překročí, MOSFET tedy není nijak proti tomuto přetížení chráněn.

V režimu konstantního odporu je proud tekoucí zátěží závislý na velikosti napětí testovaného zdroje a je mu přímo úměrný. V uvedeném zapojení (obr. 7) tedy klesne napětí na kladném vstupu budícího diferenčního zesilovače. Na druhý invertovaný vstup je přiváděn úbytek napětí na měřicím rezistoru proudu. Diferenční zesilovač se bude snažit vyrovnat odchylku změnou napětí na vstupu budícího prvku. Tím se MOSFET více uzavře, zmenší se úbytek na měřicím rezistoru a odchylka na diferenčním zesilovači se vyrovná. Odpor zůstane stále stejný.

Analogicky také v režimu konstantního proudu, kde je na velikosti vstupního napětí nezávislý. Na jeden vstup diferenčního zesilovače (budiče) přivedeme napětí, které nám reprezentuje proud a na druhý invertovaný vstup opět úbytek napětí na měřicím rezistoru. Klesne-li napětí zdroje, klesne úbytek napětí na měřicím rezistoru (klesne protékající proud) a opět zasáhne diferenční zesilovač, který vyhodnotí odchylku a doreguluje nastavený proud zpět na požadovanou úroveň.



Obr. 7 Elektronická analogová zátěž - schéma [16]

Tato zátěž dále disponuje komparátorem, který lze využít například při testování kapacity baterie, nebo při jejím vybíjení. Ten je vlastně opět tvořen diferenciálním zesilovačem zapojeným jako komparátor. Na jeden vstup se přivede požadované nastavené napětí a na druhý napětí zdroje. V případě poklesnutí napětí zdroje pod danou úroveň dojde k překlopení výstupu komparátoru a zvýšení napětí na invertujícím vstupu diferenciálního zesilovače pro MOSFET. To způsobí, že proud tekoucí regulačním tranzistorem klesne na nulu.

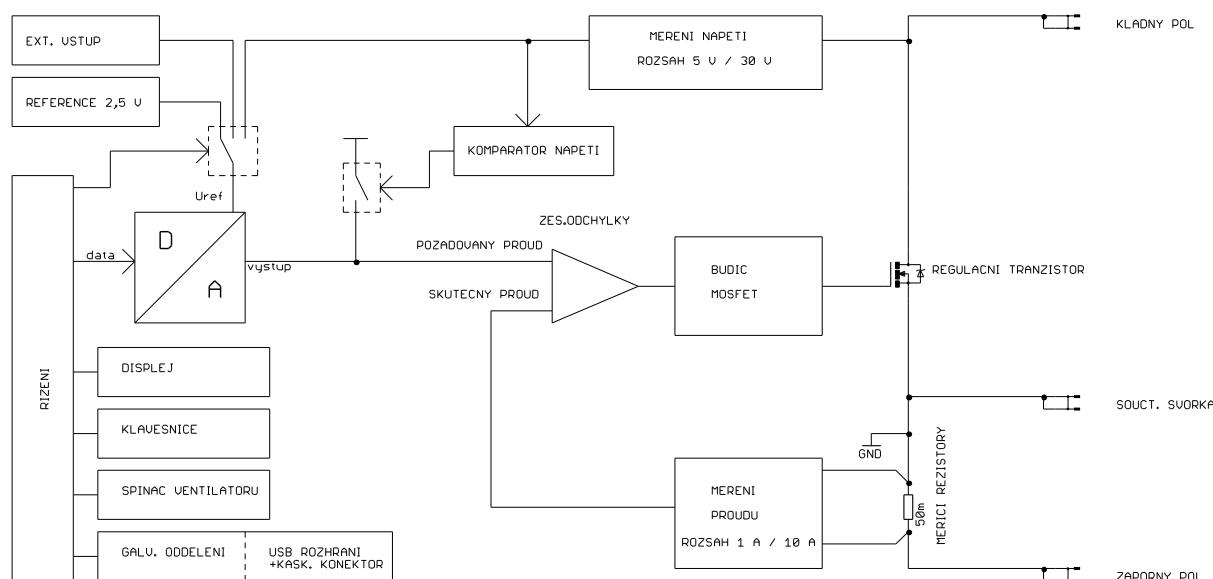
Posledním funkčním blokem, který tento přístroj obsahuje, je generátor. Ten se využívá k dynamickému testování zdroje spínáním zátěže. Tímto způsobem se může testovat například fungování ochrany zdroje při překročení povoleného proudu. Základním prvkem je zde časovač NE555 v daném zapojení, jehož frekvence se nastavuje přepínáním kapacit. Obvod generuje pravoúhlý signál a vypíná a spíná napětí na vstupu budiče stejným způsobem jako blok s komparátorem. Podobné schéma, ale s podrobnějším popisem, lze nalézt i v literatuře [15].

## 3.2 Zátěž řízená mikroprocesorem

### 3.2.1 Základní struktura

Zátěž řízená mikroprocesorem je v podstatě analogová zátěž, ke které se přidala digitální část. Touto úpravou se značně rozšíří její možnosti jako je možnost propojení s PC, uchovávání změřených dat, grafické zpracování dat, možnost měřit časově závislé veličiny a další, které bychom museli jinak sami složitě měřit či počítat. Z hlediska blokové struktury si jsou zátěže velmi podobné.

Pro inspiraci je zde vloženo velmi pěkné blokové schéma elektronické zátěže (obr. 8), které bylo uvedeno v Praktické elektronice a je i dostupné na webu [2][6]. V tomto blokovém schématu vidíme velmi dobře promyšlenou a názornou koncepci celého zapojení zátěže. Kromě standardních již výše zmíněných bloků rozšířila mikroprocesorová jednotka celé schéma o vstupně výstupní bloky, tj klávesnice, displej, modul komunikace s USB, D/A převodník tak i o další prvky jako jsou obvody spínání ventilátoru a zdroje referenčního napětí pro D/A převodník. Tímto způsobem se výrazně zlepšilo uživatelské rozhraní, zadávání hodnot požadované veličiny a přímo zobrazené hodnoty na displeji. Také mikroprocesorová jednotka může ohlídat a v případě potřeby zasáhnout při překročení dovolených výkonových parametrů zátěže (například teploty).



Obr. 8 Elektronická zátěž - blokové schéma [2]

Hlavní rozdíl, pomíne-li základní mikroprocesorové příslušenství, oproti předchozí verzi je v nastavování referenčního napětí  $V_{ref}$  D/A převodníku. Tím je možné docílit několik režimů. Referenční napětí lze elektronicky přepínat buď na vnitřní referenční napětí 2,5V, napětí na vstupu pro externí modulaci nebo na výstup z odporového děliče měření napětí.

V obvodu vidíme ještě jeden výstup navíc označený jako součtová svorka, kterou je možné jednak externě změřit úbytek napětí na měřicím odporu, ale hlavně odvést část proudu, který by jinak procházel tranzistorem.

Obvody měřiče napětí a proudu obsahují přepínače rozsahů měření, abychom docílili lepšího rozlišení při malých úrovních napětí nebo proudu. Tyto hodnoty dále přenášíme jednak do regulačních obvodů (diferenciální operační zesilovače) a přes A/D převodník přímo do mikropočítače. Většina mikropočítačů má převodník zabudován přímo v sobě.

Velkou výhodou tohoto přístroje je, že v něm nemusí být použito nějak extrémně přesných rezistorů, ale pouze rezistorů teplotně stabilních. Setrvalé chyby hodnot se vykompenzují při softwarové kalibraci přístroje. Nesmí ale být použity takové součástky, které jsou nadměrně tepelně závislé nebo jinak mění své vlastnosti, například stárnutím.

Další bloky, které jsou v blokovém schématu uvedeny, jsou více či méně popsány v následující kapitole.

### 3.3 Základní konstrukční bloky zátěží s mikroprocesorem

V této kapitole jsou stručně popsány bloky, které obvody elektronických zátěží obsahují, nebo by je mohli obsahovat. K některým těmto blokům už bylo něco v práci řečeno a tak se jich dotkneme jenom zlehka a zopakujeme jejich základní princip a jejich důvod použití

#### 3.3.1 Mikroprocesor

Tato součástka je srdcem celého přístroje. Zajišťuje nám komunikaci s PC nebo s ostatními přístroji stejného typu, pokud to ovšem umožňuje. Dále ovládá všechny komponenty k němu připojené jako je displej, klávesnice, přepínače referenčních napětí pro D/A převodník, měří hodnoty napětí a proudu na svorkách přístroje, počítá potřebné data pro uživatele, a nastavuje základní módy celého zařízení.

Procesor samotný můžeme použít jakýkoliv, jen musí mít dostatečně velkou paměť programu, rozhraní pro pomocné obvody (D/A převodník,...) a dostatečný pracovní kmitočet

aby stíhal ovládat všechny potřebné periferie. Dále musí mít dostatečný počet vývodů, aby je mohl vůbec k sobě připojit.

### 3.3.2 Ovládání

K základnímu ovládání celého přístroje slouží klávesnice. Obecně se jí lze pohybovat v menu, vybírat potřebné parametry a zadávat hodnoty například vstupního odporu zátěže. Podle požadavku může mít libovolný počet vývodů, ale to jsou spíš klávesnice vyráběné na zakázku. V obchodech s elektronickými součástkami jsou k dostání především klávesnice 4x4 nebo 3x4 s čísly 0 až 9 a symboly „\*,#;A;B;C;D”. Pro připojení k mikropočítači většinou potřebuje 7 až 8 pinů a ve zvláštních případech i víc (záleží na způsobu ovládání). Použitím klávesnice tedy zabere přibližně jeden 8bitový port mikropočítače.

Pro plynulejší a intuitivní nastavení požadované veličiny se můžou využít také otočné prvky a to potenciometry nebo rotační snímače polohy. U potenciometrů je velkou nevýhodou to, že zůstane „viset“ na poslední nastavené hodnotě. Rotační snímače polohy mají jiný princip snímání nastavené hodnoty, a proto lze přizpůsobit hodnotu na požadovanou startovní pozici. Na rozdíl od potenciometrů jsou využitelné pouze v digitálních obvodech. Snímání hodnoty (v případě dvoukanálového snímače) je prováděno počítáním pulzů, které jsou vzájemně fázově posunuty, a tím se rozliší směr otáčení. Tyto snímače můžou být mechanické nebo optické (velmi drahé) a dosahují počet impulzů na otáčku 10 až několik stovek.

### 3.3.3 Displej

Je součástka, která informuje uživatele o změřených veličinách a případně nastavovaných hodnotách. Existuje velké množství displejů, ale nás budou zajímat především takové typy, které jsou schopny vykreslit text, popřípadě grafiku a nebudou příliš zaměstnávat procesor. Dále budou mít malý odběr a přímou napojitelnost na TTL logiku. Tyto požadavky splňují displeje LCD. Rozlišujeme 2 základní typy LCD displejů: Alfnumerické a grafické. Oba druhy se vyrábí v různých velikostech a většinou mají v sobě integrovaný řadič (např. HD44780), který se stará o obnovu obrazových bodů a má v sobě uloženou základní znakovou sadu. Grafický displej umí kromě textu kreslit také různé obrazce a dají se na něm vytvořit velice pěkná a přehledná menu. Displej může zabírat kolem 8 pinů procesoru.

### 3.3.4 D/A, A/D převodník

A/D a D/A převodníků máme celou škálu a obecně platí čím rychlejší a čím více bitů má, tím je dražší. Existují například paralelní a sériové, nepřímé D/A převodníky a komparační, kompenzační, integrační A/D převodníky a mnoho dalších. Liší se především v rychlosti převodu a počtem bitů. V elektronické zátěži je převodník potřeba k tomu, abychom byli schopni mikroprocesorem změřit nebo poslat na výstup požadované napětí. Procesor ATmega16 má v sobě integrovaný 10bitový A/D převodník, ale D/A převodník musíme použít externí také s velikostí kolem 10 bitů. Na počtu bitů velmi záleží, neboť nám určuje, jak dobře jsme schopni nastavit výstupní napětí a v kolika krocích. Tak například dvoubitový převodník je schopen rozeznat  $2^2$  hodnot, tedy celkem 4 hodnoty. Místo D/A převodníku lze použít i PWM modulaci s následnou filtrací nebo by šel použít i elektronický potenciometr. Digitální elektronické zátěže nemají velké nároky na rychlost převodu, ale především na počet bitů převodníku. Více o D/A převodnících je možno se dočíst v literatuře [5].

### 3.3.5 Výstupní výkonový obvod

Za výstupní výkonový obvod je považována součástka, která nám reprezentuje samotný odpor. Může se použít bipolární nebo unipolární tranzistor. V těchto případech se používá především unipolárních tranzistorů a to hlavně typu MOSFET. Jejich výhoda je v tom, že jsou řízeny elektrickým polem (napětím), poněvadž s ním převážně v obvodech pracujeme (signál z D/A převodníku, proud je měřen jako úbytek napětí na rezistoru) Tyto tranzistory jsou sami o sobě velmi výkonové, ale pokud přece jenom potřebujeme zvýšit výkon zařízení, můžeme jich zapojit více paralelně k sobě. Tím je povolená výkonová ztráta přímo úměrná počtu paralelních tranzistorů. Navíc se tak zlepší přenos tepla na chladič (větší plocha) a zmenší se celkový minimální odpor. Jedinou nevýhodou spojování je zvyšující se kapacita  $C_{GS}$  MOSFETU a její nutná kompenzace (aby se obvod nerozkmital).

### 3.3.6 Napájení

Tento obvod je nepostradatelnou součástí celého systému, bez něhož by žádná jeho část nebyla funkční. Napájení jednotlivých periférií zátěže většinou nespotřebuje příliš velký výkon, a proto stačí použít jako zdroj obyčejný transformátor, graetzův můstek, několik kondenzátorů a stabilizátor. Případně lze použít i spínaný zdroj, ale zde se musí dát pozor, aby nedocházelo k rušení mikroprocesoru. Pro mikroprocesor a jeho periférie je potřeba napájení 5 V. Pro ostatní obvody, jako jsou operační zesilovače, budiče MOSFET a podobně, potřebujeme 12 V. V některých případech je nutné i záporné napětí, záleží na typu použitých součástek.

### 3.3.7 Měření napětí, měření proudu

Tyto bloky jsou velmi důležité, neboť na základě nich procesor počítá požadovaná data a podle nich se doladuje výsledný odpor, proud či napětí. Pro zvýšení přesnosti měření se mění rozsahy měření. Pro napětí je tvořeno jednoduchou formou odporových děličů. Pro měření proudu však musíme použít i zesilovač. Proud nemůžeme měřit přímou metodou, ale můžeme ho měřit jako úbytek napětí na známém odporu. Tento odpor je velmi malý, aby bylo možno regulovat proud v požadovaném rozsahu. Úbytek napětí je na tomto prvku velmi malý, proto pro jeho měření je nutné do obvodu zařadit operační zesilovač. Pro měření s dostatečnou přesností i pro malé proudy je nutno zavést několik měřicích rozsahů. Většinou si v elektronických zátěžích vystačíme s 2 až 3 rozsahy. Pokud bychom chtěli měřit proud např. odděleně, lze využít pro snímání proudu speciálních součástek s Hallovou sondou. Jejich jmenovitý dovolený proud může dosahovat i 150A. Více se o těchto součástkách a použití lze dovědět v literatuře [23].

### 3.3.8 Budič výkonového prvku

Používá se tam, kde výkon ladících prvků by nestačil dodat požadovanou energii do výkonového prvku, nebo by přímé propojení způsobilo rozladění regulačních prvků. U MOSFETů (s indukovaným kanálem) je nutné v případě impulzního režimu dostatečně rychle dodat nebo odebrat z kapacity  $C_{GS}$  náboj, určující otevřenost tranzistoru. Dále budiče mohou upravovat napěťový rozsah. Jako budič můžeme použít například operační zesilovač s dostatečným výstupním výkonem nebo zesilovač z diskretních prvků.

### 3.3.9 Zdroje referenčního napětí

Referenční napětí slouží především pro A/D a D/A převodníky. Změnou jejich velikosti můžeme docílit několika funkcí. V zapojení na obr. 8 jsou použity 3 zdroje referenčního napětí. Pro standardní funkci je použito referenční napětí o velikosti 2,5V. Pokud bychom chtěli použít dynamický režim, použijeme externí vstup obdélníkového

signálu nebo vnitřního generátoru, který v tomto zapojení není. Poslední referenční zdroj je zapojen přímo na „změřené“ napětí a využívá se v režimu konstantního odporu. Takto D/A převodník pracuje v podstatě jako elektronický potenciometr.

### 3.3.10 Systém chlazení

Tento systém je neméně důležitou součástí celého zapojení. Je důležité si uvědomit, že výkon, který odebíráme ze zdroje se na „umožňovacím“ prvku mění v teplo a to je potřeba nějakým způsobem co nejrychleji a nejefektivněji odvádět pryč. Základním prvkem je chladič, který musí mít dostatečné rozměry na to, aby obvod uchlادil. Pro zmenšení rozměrů chladičů se používá aktivní chlazení a to ventilátor. Řízení ventilátoru lze zajistit pomocí obvodu, který podle teploty řídí jeho otáčky, nebo spíná ventilátor až od určité teploty. Obvod bývá složen z teplotního čidla, komparátoru nebo operačního zesilovače. Pro řízení ventilátoru je možné využít i mikroprocesor.

### 3.3.11 Systém proudové, přepětové a tepelné ochrany

K tomu, abychom uchránili důležité části zařízení (a nejen je, ale i osob a např. PC) před zničením, nám slouží systém důmyslných ochran. Pokud by se nám zvýšilo napětí nebo proud nad dovolenou mez, měl by ochranný systém ihned zareagovat a učinit takové opatření, aby nemohlo dojít k poškození přístroje či k úrazu nebo škodám na majetku. Tento systém může pracovat samostatně, nebo může být vhodně zakomponován do celého systému (například vhodným algoritmem v procesoru). Pro ochranu vniku vysokých napětí do PC nám slouží galvanické oddělení komunikace prostřednictvím optočlenů.

### 3.3.12 Komparátor napětí

Tato část nám slouží k odpojení nebo přerušení například vybíjecího procesu baterie. Pokud tedy vybíjíme nebo testujeme baterii a nechceme, aby napětí kleslo pod určitou mez, nastavíme na komparátoru požadované minimální napětí a pokud klesne napětí pod tuto mez, komparátor zasáhne. Podle schématu obr. 8 srazí napětí převodníku na zem a tím uzavře výkonový prvek. Stálým měřením a porovnáváním hodnot v procesoru lze funkci realizovat v algoritmu. Reakce na změnu veličin však bude mnohem pomalejší.

### 3.3.13 Generátor obdélníkového průběhu

Generátorem přidaným do zátěže můžeme testovat chování testovaného zdroje při pulzním režimu zátěže. Pokud bychom ho chtěli do schématu zařadit, tak si můžeme vybrat ze tří variant. Generovat ho samotným mikroprocesorem, postavit si ho například z obvodu NE555 a integrovat ho do zařízení, nebo připojit externí generátor. Generovat signál v širokém rozmezí moc význam nemá a teoreticky by mohlo stačit pár diskrétních kmitočtů např. 100Hz, 1kHz, 10kHz.

## 3.4 USB rozhraní - vlastnosti a implementace do $\mu$ PC

### 3.4.1 USB (Universal Serial Bus) – vlastnosti

USB rozhraní se v poslední době stalo nepostradatelnou součástí PC a všech zařízení, jakými mohou být například mobilní telefony, fotoaparáty, tiskárny a mnoho jiných. Svou oblibou a svými výhodami nahradila dříve používané sériové rozhraní RS232, které v současné době už na nových počítačích téměř nenajdeme. Z tohoto důvodu museli výrobci začít tuto sběrnici ve svých přístrojích podporovat.

Komunikační rychlost tohoto rozhraní je oproti RS232 mnohem vyšší a pohybuje se od 1,5Mbit/s do 487Mbit/s. Záleží na tom, jaká verze USB je podporovaná (USB1.1

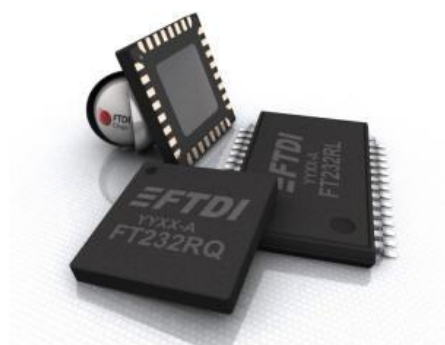


a USB2.0) a samozřejmě na módu, ve kterém pracuje (High Speed, Full Speed 12Mbit/s a Low Speed). Jednotlivé verze jsou vzájemně kompatibilní a není tedy problém s připojením zařízení USB 1.1 do vyšší verze USB2.0. Další výhodou je, že k němu lze připojit až 127 zařízení pomocí jednoho konektoru. Rozbočení se provádí pomocí speciálních USB HUBů. Mezi další výhody řadíme dále rozvod 5V napájení a maximální možný proudový odběr až 500 mA. Maximální délka propojovacího kabelu může být 5 m. Dále USB disponuje automatickou detekcí připojení a odpojení periférie, podporou asynchronního i synchronního přenosu, vysokou efektivitou protokolu a je podporován širokou škálou operačních systémů.

Z elektrického hlediska toto rozhraní používá pro komunikaci mezi zařízeními 4 vodiče:  $V_{BUS}(+5V)$ , GND, D-, D+. Mód rychlosti, Full Speed nebo High Speed, se definuje připojením rezistoru na hostitelském řadiči na vstup D+ či D- (obr. 10). Uživatel se však o toto většinou nemusí starat, neboť připojuje většinou obvod k nějakému převodníku (např. USB -USART), který se o to postará sám nebo se mód rychlosti nastaví pomocí speciálního programu. Způsobů, jak připojit jednotlivé periférie a jak komunikovat s jejich centrální řídicí jednotkou, je několik. Může to být formou FTDI čipu, softwarovou implementací nebo přímou podporou řídicí jednotky (mikropočítače). Více se o tomto rozhraní a jeho využití můžeme dozvědět z literatury [14][20].

### 3.4.2 Implementace USB pomocí FTDI čipu

Tento způsob implementace je asi nejznámější, nejjednodušší a proto nejpoužívanější. FTDI čip je součástka, která převádí USB komunikaci na UART a zpět. Tedy do obvodu připojíme tuto součástku a s procesorem komunikujeme pomocí sériové asynchronní sběrnice UART, která už bývá součástí téměř každého mikroprocesoru.



Obr. 9 FTDI čip [10]

Těchto čipů může být více druhů. Nejznámější je asi čip FT232R či FT245 od firmy Future Technology Devices International Ltd. Tyto obvody potřebují minimum externích součástek. Obsahují interní 12MHz oscilátor, s možností vyvedení frekvence ven pro jiné obvody, dále EEPROM pro uložení USB identifikace (VID a PID) i uživatelských dat a mnoho dalších funkcí. Nevýhodou, kterou tento obvod přináší, je možná jen trochu složitější deska plošných spojů a navýšení ceny výchozího výrobku. Je to veliký pomocník v oblasti propojování elektronických zařízení k PC.

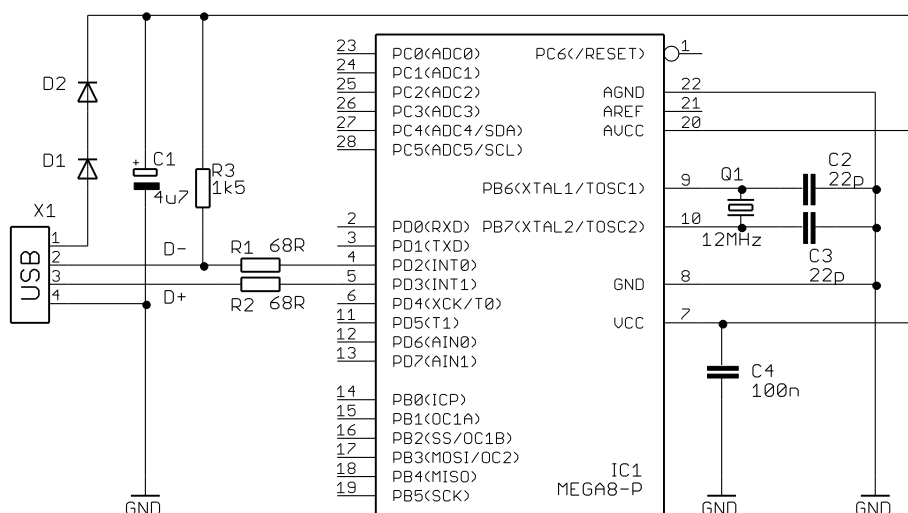
Po připojení ke stolnímu PC se obvod může hlásit jako standardní sériový port nebo jako USB zařízení. Záleží na nainstalovaném USB ovladači obvodu FT232R. Pro oba případy jsou na stránkách výrobce [24] ke stažení příslušné ovladače (VCP nebo D2XX). Navíc je taktéž ke stažení dynamická knihovna, která je rozhraním pro aplikační programy vytvářené ve vývojových prostředích Visual C++, C++ Builder a další. Více informací o obvodech FTDI lze nalézt v literatuře [20].

### 3.4.3 Softwarová implementace USB

Další možností, jak propojit PC a dané zařízení je implementovat komunikační protokol USB sběrnice přímo do procesoru. Toto řešení je nejsložitější a začátečníkům se nedoporučuje. Jednak se musí zajistit ovladače pro operační systém (sám naprogramovat), dále vytvořit uživatelskou aplikaci, která s tímto zařízením komunikuje a nakonec sestavit a vložit celý komunikační protokol do mikropočítače. Na internetu je k nalezení spousta návodů a již vypracované volně šiřitelné programové šablony pro mikrokontroléry, které USB komunikaci řeší. Ovladače pro operační systém se zde dají také najít a podle potřeby upravit. Zde by si měl člověk ale už dávat pozor, neboť špatnou úpravou může dojít i k poškození hardwaru PC. Navíc v některých operačních systémech ovladače pracovat nemusí, nebo je nemusí systém povolit (Windows 7). Další nevýhodou je, že případné galvanické oddělení zařízení od PC by vyžadovalo větší složitost zařízení.

Pro mikrokontroléry AVR, od firmy Atmel, je na internetu [25] dostupná čistě firmwarová implementace USB a to AVR-USB. Potřebuje přibližně 2kB Flash paměti, 128B RAM, jeden zdroj externího přerušení, dva I/O piny a zdroj hodinového signálu o frekvenci minimálně 12MHz. AVR-USB je volně šířen pod licencí GNU GPL, alternativně pod komerční licencí. Další vlastnosti softwarové verze USB:

- Podporuje USB 1.1 (low-speed), mimo řízení chyb v komunikaci a některých elektrických specifikací.
- Ukázkové projekty demonstrují zařízení a implementaci ovladačů na operační systémy Linux, Mac OS X a Windows.
- Přenosové celky (pakety) až do velikosti 254 B.
- Volně použitelné USB identifikátory (Vendor-ID a Product-ID).
- Přizpůsobitelné sekce kódu jsou psány v C a jsou dobře okomentovány
- Pro základní funkce je zapotřebí pouze 1400 B - 1500 B kódu
- Můžete si zvolit mezi licencí Open Source nebo licencí komerční.



Obr. 10 Připojení USB rozhraní k procesoru – softwarová implementace [12]

### 3.4.4 Hardwarově integrováno v procesoru

Na jiné straně existují také procesory, které mají už USB rozhraní integrováno přímo hardwarově v procesoru. K jeho provozu stačí správně nastavit registry procesoru a algoritmem si programátor poté sám rozhodne, co se s přijatými daty dál bude dít. Těchto obvodů je celá řada a nabízí je mnoho výrobců (Microchip, Atmel, Freescale,...). Jako případ můžeme uvést např. obvod PIC 18F2550 od firmy Microchip, nebo další např. obvod ATmega32U6 od Atmelu. Záleží jen na programátorovi s jakými procesory má zkušenosti

a který si zvolí. Hardwarové USB rozhraní je implementováno převážně v dražších procesorech s vyšším počtem vývodů. I zde jsou potřeba, jako u každého USB zařízení, ovladače pro operační systém PC. Ty jsou většinou k dispozici na stránkách výrobců [22].

## 4 Návrh schématu elektronické zátěže

Pro navrhnutí elektronické zátěže bylo čerpáno z velké části z těchto literárních zdrojů [2], [3], [6], [11], [15], [16], kde byly již navrhnuté a odzkoušené konstrukce zátěží. V navržené zátěži byly některé části zapojení z uvedených odkazů přebrány, jiné inovovány či vymyšleny nové. Hlavní myšlenkou je efektivní řízení celé zátěže mikroprocesorovou jednotkou.

### 4.1 Očekávané parametry zátěže

Před návrhem zapojení je nejdříve důležité si dobře rozmyslet, jaké funkce a parametry má navržený přístroj mít. V samotném zadání této práce je zadán požadavek jen na mezní parametry vstupních veličin zátěže tj.  $I_{\max} = 10 \text{ A}$  a  $U_{\max} = 40 \text{ V}$  a podporu tří režimů práce kterými jsou režim konstantního odporu, napětí a proudu. Režim konstantního výkonu, který se u některých zátěží používá, požadován není. Pokud by byl implementován, složitost konstrukce by se značně zvýšila a výsledná cena zařízení také. Navíc jeho využití by bylo minimální.

#### Vstupní parametry zátěže:

Maximální vstupní napětí: 10/40 V

Maximální vstupní proud: 1/10 A

Maximální zátěžový výkon: 400 W

#### Základní testovací režimy:

Režim konstantního proudu

Režim konstantního napětí

Režim konstantního odporu

#### Rozšířené testovací režimy:

Dynamický režim (interní / externí generátor frekvence)

Měření kapacity akumulátorů

Měření vnitřního odporu zdroje

#### Další parametry:

Napájení: 230V/50Hz

Komunikace s PC: USB 2.0 a obslužný program

Galvanické oddělení PC

Klávesnice, displej

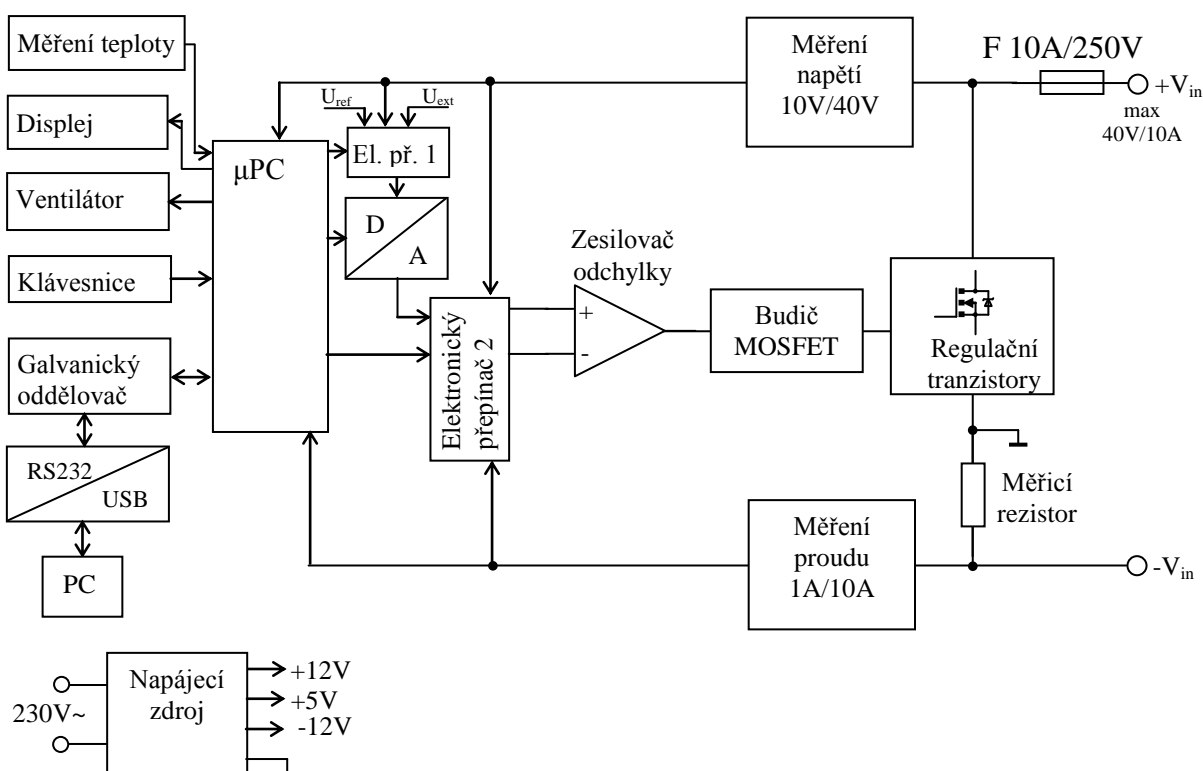
Proudová ochrana

Tepelná ochrana

Aktivní chlazení ventilátorem

## 4.2 Blokový návrh zátěže

Na obr. 11 vidíme blokový návrh celé elektronické zátěže. Skládá se ze dvou hlavních částí analogové a digitální. Analogová část je tvořena jednou hlavní větví a dvěma zpětnovazebními. Hlavní větev obsahuje zesilovač odchylky, budič regulačních tranzistorů a samotný regulační tranzistor. Zpětnovazební větve slouží pro automatickou regulaci režimů zátěže a měření skutečných hodnot napětí a proudu mikroprocesorem. Pro odstranění nežádoucích zákmitů, vzniklých na měřicím rezistoru nabíjením a vybíjením kapacit  $C_{GS}$  regulačních tranzistorů MOSFET, je svorka S (source) tranzistoru hned uzemněna. Na měřicím rezistoru tedy bude napětí opačné polarity. Proto je nutné podložit operační zesilovače záporným napětím -12 V. Nežádoucí rušení by se nejvíce projevilo hlavně v dynamickém režimu zátěže. K analogovému bloku patří také napájecí zdroj. Napájení je řešeno přímo z distribuční sítě 230V. Pro napájení operačních zesilovačů jsou nutná napětí +12 V a -12 V. Pro digitální obvody 5 V.



Obr. 11 Elektronická zátěž - blokové schéma (návrh)

Digitální část nám v blokovém schématu reprezentuje hlavně mikroprocesor, který celý přístroj řídí a přijímá povely od obsluhy a také informuje o změřených veličinách. Dále se stará o nastavení správného režimu pomocí obou elektronických přepínačů a nastavení D/A převodníku.

Elektronický přepínač 1 slouží k výběru referenčního napětí a to interní 2,5V, nebo externí, který lze využít pro různou modulaci zátěže. Třetím vstupem tohoto přepínače je měřené napětí. Tento vstup se využije v odporovém režimu, kdy D/A převodník bude fungovat jako elektronický potenciometr.

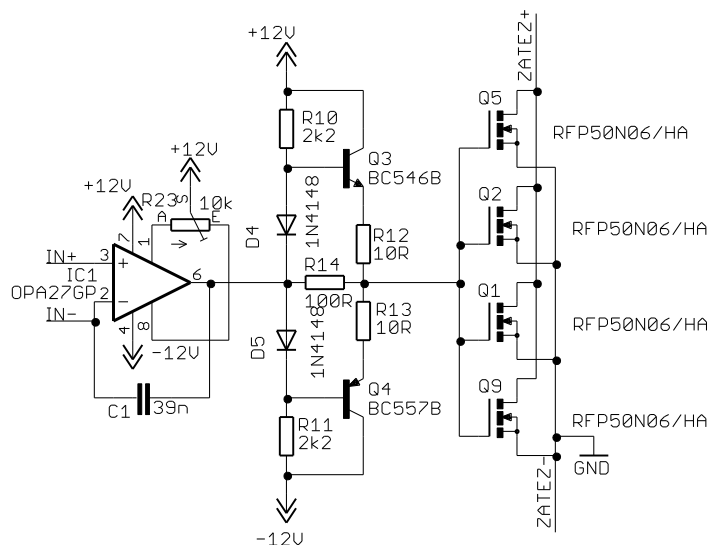
Druhý elektronický přepínač slouží k volbě mezi jednotlivými základními režimy zátěže. V režimu konstantního odporu a proudu bude na neinvertující vstup zátěže připojen výstup z D/A převodníku a na druhý (invertující) měřený proud. V režimu konstantního napětí je naopak nutné přivést napětí z D/A převodníku na invertující vstup a měřené napětí na neinvertující.

Mikroprocesor dále zpracovává informaci o teplotě chladiče pomocí tepelného odporového snímače. Pokud teplota stoupne nad určitou mez, mikroprocesor ventilátor sepne. Dále mikroprocesor obsluhuje LCD displej, klávesnici a komunikuje pomocí rozhraní USB se stolním počítačem (s odpovídajícím obslužným softwarem). Přístroj bude schopen pracovat samostatně bez nutnosti připojení PC. Pro ochranu PC před zničením nebezpečným napětím, které by mohlo do komunikační sběrnice vniknout vlivem poruchy zátěže, je obvod galvanicky oddělen optočleny.

## 4.3 Analogová část

### 4.3.1 Hlavní regulační větev

Hlavní regulační část je tvořena třemi prvky. Zesilovačem odchylky, budičem MOSFET tranzistorů a regulačními tranzistory. Přímé rozkreslení hlavní větve je vidět na obr. 12. Jako zesilovač odchylky byl zvolen operační zesilovač OPA27, který má velkou přesnost, zesílení (až 120 dB), symetrické napájení (max.  $\pm 22$  V), dobré frekvenční vlastnosti a velkou rychlost přeběhu ( $2,8$  V/ $\mu$ s). Pro vynulování napěťového offsetu tohoto operačního zesilovače slouží trimr  $R_{23}$ , kterým lze regulovat odchylku o  $\pm 4$  mV. Ve skutečnosti se však odchylka pohybuje v rozmezí maximálně  $\pm 100$   $\mu$ V. Protože je zátěž kapacitního charakteru (tranzistory MOSFET), je nutné ji kompenzovat. K tomuto účelu slouží kapacitor  $C_1$ , a je nutné jej volit podle použitých MOSFETů. Ze simulace byla teoreticky určena velikost této kapacity na 40 nF. V praxi se ovšem bude muset zvolit experimentálně. Tento kondenzátor také zabráňuje rozkmitání obvodu při změně parametrů a dynamickém režimu zátěže. Do velké míry nám ovlivňuje taky dobu ustálení obvodu.



Obr. 12 Hlavní regulační větev

Dalším prvkem je budič tranzistorů MOSFET. Slouží k rychlému přivedení a odvedení náboje pro požadované otevření tranzistorů. Tato část slouží pouze k posílení výstupu zesilovače odchylky  $IC_1$ . Příliš pomalým nabíjením kapacity  $C_{GS}$  by obvod reagoval velmi pomalu a mohl by příliš zatěžovat diferenciální zesilovač  $IC_1$ . Budič je tvořen tranzistory  $Q_3$ ,  $Q_4$  v komplementárním zapojení. Pracovní bod je určen odpory  $R_{10-14}$  a diodama  $D_{4,5}$ .

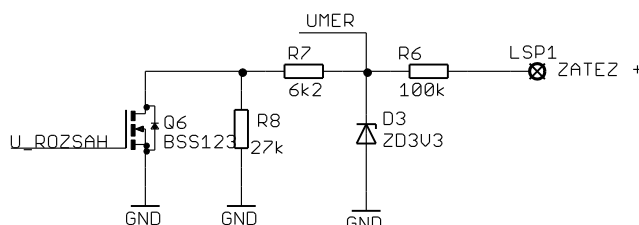
Regulačními prvky byly zvoleny MOSFET tranzistory RFP50N06/HA, které mají odpor v plně otevřeném stavu 22 m $\Omega$ , maximální ztrátový výkon 131 W, max. napětí  $U_{GS} = 60$  V a  $I_{DSmax} = 40$  A. Paralelním spojením 4 těchto tranzistorů docílíme ztrátového výkonu až 524 W a minimálního odporu 5,5 m $\Omega$ . Vzhledem k zadání je elektronická zátěž předimenzována. Paralelním spojením tranzistorů také dosáhneme lepšího odvodu tepla

z aktivních prvků, a menšího minimálního odporu. Minimální odpor již ovšem ovlivňují přívodní vodiče, součástky připojené do silového obvodu a přechodové odpory svorek. Jedinou nevýhodou paralelního spojení je zvyšující se kapacita  $C_{GS}$ , která způsobuje zákmity při regulaci a zpomaluje dobu ustálení obvodu.

Pro zapojení je možno použít jakékoliv tranzistory MOSFET s indukovaným kanálem N. Jiný tranzistor však bude vykazovat trochu jiné parametry (především  $C_{GS}$ ,  $R_{DS}$ ) a bude se více lišit od simulace. Kompenzační kapacitu  $C_1$  bude nutné opět přizpůsobit. Uvedený unipolární tranzistor byl zvolen především kvůli svému nízkému odporu a podporou programu ORCAD (knihovny).

#### 4.3.2 Napěťová zpětná vazba

Napěťová zpětná vazba nám slouží pro režim konstantního odporu a napětí a pro měření napětí mikroprocesorem. Je tvořena jako odporový dělič (odpory  $R_6$ ,  $R_7$ ,  $R_8$  viz. obr. 13), a lze jí nastavit rozsahy 10 V a 40 V. Pro kompatibilitu s napětím D/A převodníku je maximální výstupní hodnota děliče 2,5 V. Změna rozsahu se provádí sepnutím tranzistoru  $Q_6$  (rozsah 40 V), který má v otevřeném stavu odpor přibližně  $10\Omega$  a vzhledem k vysokým hodnotám odporů jej lze zanedbat.



Obr. 13 Měření napětí, zpětná vazba

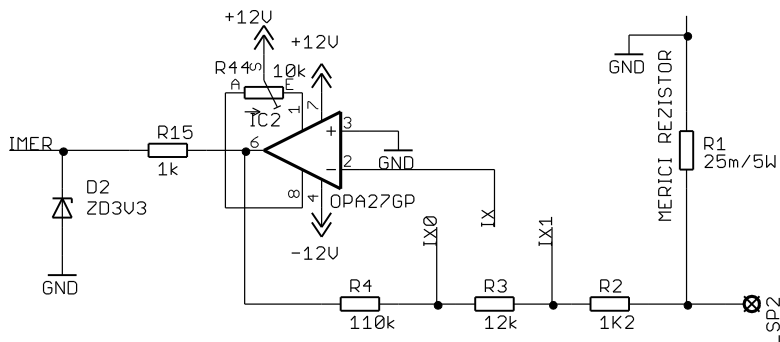
Přenos děliče se dá vypočítat pomocí následujícího vzorce:

$$K = \frac{U_{MER}}{U_{ZATEZ}} = \frac{R_B}{R_A + R_B} \quad (-; V, V ; \Omega, \Omega) \quad (4.1)$$

kde pro rozsah 40 V platí:  $R_B=R_7$  a  $R_A=R_6$ . Pro rozsah 10 V platí:  $R_B=R_7+R_8$  a  $R_A=R_6$ . Výsledný napěťový přenos je pro první rozsah  $K_{40V} = 58,4 \cdot 10^{-3}$  a pro druhý  $K_{10V} = 249 \cdot 10^{-3}$ .

#### 4.3.3 Proudová zpětná vazba

Proudová zpětná vazba je realizována jako úbytek napětí na měřicím rezistoru  $R_1$  o velikosti  $25\text{ m}\Omega$  zesíleného invertujícím zesilovačem napětí  $IC_2$ . Velikost zesílení se nastavuje pomocí kombinace rezistorů  $R_{2-4}$ . Pro měření proudu jsou uvažovány 2 rozsahy 10 A a 1 A. Hodnoty součástek jsou navrženy tak, aby výstupní napětí  $U_{IMER}$  pro dané rozsahy nepřesahovali hodnotu 2,5V. Rozsahy se přepínají elektronickým přepínačem.



Obr. 14 Měření proudu, zpětná vazba

Přenos proudové zpětné vazby se vypočítá podle vztahu:

$$K = \frac{U_{IMER}}{I_{R1}} = \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) R_1 \quad (-; V, A ; \Omega, \Omega, \Omega) \quad (4.2)$$

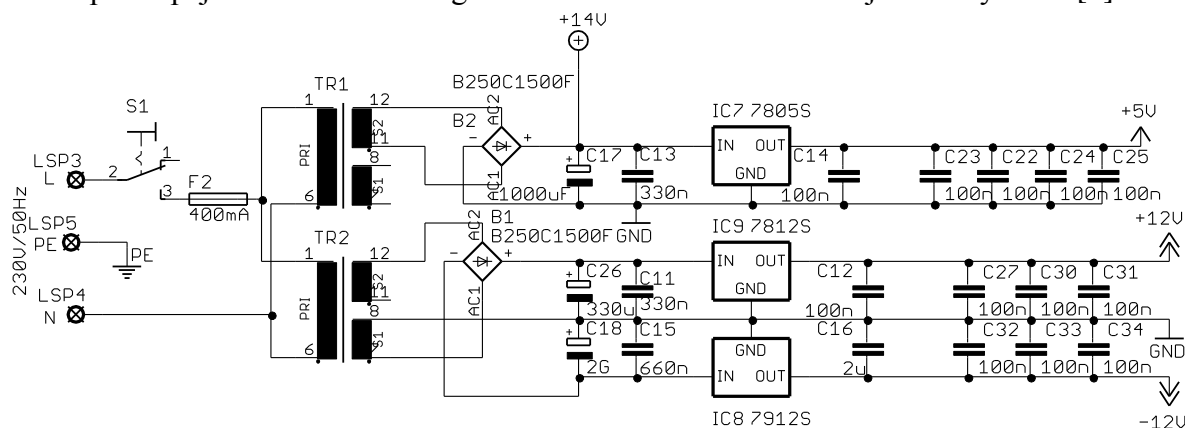
kde pro rozsah 10 A je  $R_A=R_2+R_3$  a  $R_B=R_4$ . Pro rozsah 1 A platí  $R_B=R_3+R_4$  a  $R_A=R_2$ . Výsledný přenos je pro první rozsah roven  $K_{10A}=0,233$  a pro druhý  $K_{1A}=2,37$ . Měřicí rezistor  $R_1$  musí být dostatečně výkonově dimenzován. Výkon, který musí rezistor vydržet lze vypočítat podle vztahu:

$$P = U \cdot I = R \cdot I^2 \quad (W; V, A ; \Omega, I) \quad (4.3)$$

kde  $R=R_1=25m\Omega$  a  $I_{max} = 10A$ . Pro tyto hodnoty je minimální výkon rezistoru určen na 2,5 W.

#### 4.3.4 Napájení

Napájení je tvořeno dvěma síťovými transformátory a lineárními stabilizátory pro napětí 5 V a  $\pm 12$  V řady 78XX a 7912 (-12V). Transformátory mají jmenovité výstupní napětí 2x12V a 2x9V o výkonu 10VA. Obě napětí jsou usměrněna diodovým můstkem a kondenzátory a stabilizována lineárními stabilizátory. Napětí  $\pm 12$  V (symetrický zdroj) slouží pro napájení operačních zesilovačů a budiče MOSFET tranzistorů. Druhá sekundární větve je určena pro napájení ventilátoru a digitálních obvodů. Návrhem zdrojů se zabývá lit. [1].



Obr. 15 Napájecí zdroj

### 4.4 Digitální část

#### 4.4.1 Mikroprocesor

Procesor se bude starat o veškerou obsluhu připojených periférií, přijímání požadavků obsluhy a počítání či měření vlastností zdrojů. Parametry se do něj mohou zadávat prostřednictvím klávesnice nebo z aplikace PC. Tyto požadavky určují nároky na použitý procesor.

Pro řízení celého zařízení byl zvolen 8bitový mikroprocesor ATmega128A-AU. Pro naše účely je sice velmi předimenzovaný (velká paměť), ale má dostatek pinů pro naše zapojení. Právě kvůli tomuto kritériu nelze použít pro řízení zátěže nižší verze procesorů např. ATmega32. Cenový rozdíl těchto procesorů je zanedbatelný (cca. 30Kč). Potřebná paměť pro firmware zařízení se bude odhadem pohybovat mezi 16KB a 32KB. Kmitočet hodinového signálu byl zvolen maximální v této řadě a to 16MHz. Jeho hlavní parametry jsou:

- 128 KB programové paměti FLASH
- 4 KB EEPROM

- 4 KB vnitřní paměti SRAM
- podpora SPI
- 53 I/O pinů
- 2x8 bitový čítač
- 2x16 bitový čítač
- 8-kanálový 10-bitový A/D převodník
- maximální hodinový kmitočet 16MHz
- vnější a vnitřní zdroje přerušení
- PWM modulace
- 2xUSART
- napájecí napětí 2,7 V – 5,5 V

To zdaleka nejsou všechny možnosti procesoru. Více lze najít v literatuře [22].

### 4.4.2 Displej



Obr. 16 LCD displej

Displej byl zvolen MC1604B-SYL, který je vyroben technologií LCD se zeleným LED podsvícením. Obsahuje standardní řadič HD44780 od firmy HITACHI, který se stará o obnovu obrazových bodů a obsahuje sadu stanovených alfanumerických znaků (především anglických) plus možnost si 8 vlastních znaků nadefinovat. Displej má 4 řádky o délce 16 znaků. Pro jeho připojení je potřeba 6 pinů procesoru, tři vodiče napájení a jeden pro řízení kontrastu (viz. příloha č. 1: celkové schéma elektronické zátěže).

### 4.4.3 Ovládací prvky



Obr. 17 Fóliová klávesnice

Základním ovládacím prvkem zařízení bude sériově vyráběná fóliová klávesnice, která je zobrazena na obr. 17. Výrobce klávesnice je firma TT Klávesnice, a.s. Obsahuje 16 kláves z toho 10 číselných + klávesu ENTER a SHIFT. Klávesu SHIFT můžeme využít například pro aktivaci speciálních kláves (vyznačeno červeně), záleží jen na programátorovi, zda je využije. Použitá klávesnice má maticové snímání zmáčknutých kláves (3 sloupce, 2 řádky) a umožňuje vyhodnocení zmáčknutí pouze jednoho tlačítka. Klávesnice má ze zadní

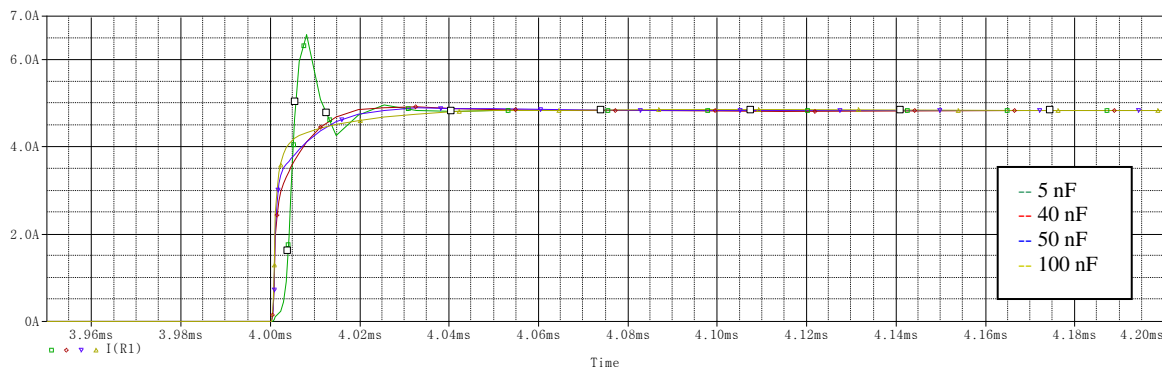




## 5 Simulace klíčových částí analogové konstrukce

### 5.1.2 Skoková změna řídicího napětí $V_{IN}$ a kapacity $C_1$

Na obr. 20 vidíme vliv kompenzační kapacity  $C_1$  na ustálení obvodu v závislosti na skokové změně vstupního napětí. Skokové napětí na vstupu je definováno jako změna napětí  $V_{IN}$  z 2,5V na 1V za 1ns. Doba ustálení je definována jako nepřesnost  $\pm 1\%$  od ustálené konečné hodnoty po skokové změně. Proud je snímán z vnitřního odporu  $R_1$  testovaného zdroje

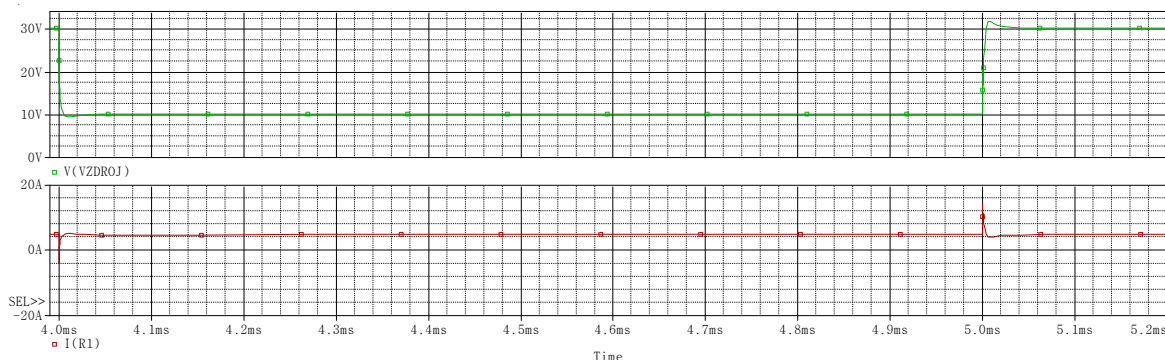


**Obr. 20 Závislost skokové změny napětí na ustálení výstupního proudu**

Nejrychleji se obvod ustálil při kapacitě  $C_1 = 5 \text{ nF}$  za 30,133  $\mu\text{s}$  a nejdéle pro kapacitu 50 nF za 56,2  $\mu\text{s}$ . Nejmenší kapacita má sice nejkratší dobu ustálení, ale má velmi velké překmity, které mohou překonat i horní mez přípustného proudu a aktivovat ochranné obvody a vypnutí celého zařízení. Další nejmenší doba ustálení je pro kapacitu 100 nF (37,9  $\mu\text{s}$ ), ovšem zde je nutné brát v úvahu i režim konstantního napětí, který pro tuto kapacitu podstatně větší dobu ustálení. Proto je nutné zvolit kompromis a kapacitu zvolit přibližně 40 nF (doba ustálení 46,1  $\mu\text{s}$ ) a ta je použita i v dalších simulacích. Navíc v modelech součástek nejsou zahrnuty další možné vlivy (parazitní  $C$ ,  $L$ ) a kapacita se stejně bude muset určit až experimentálně pomocí osciloskopu. Pro příliš malé kapacity  $C_1 < 1 \text{ nF}$  se obvod může rozkmitat.

### 5.1.3 Skoková změna napětí na zatěžovaném zdroji

Tato simulace nám pomáhá znázornit chování obvodu například při měření pulzního zdroje. Napětí zdroje je skokem měněno z 30 V na 10 V a zpět. Vzestupná a sestupná hrana má trvání 1ns (platí pro  $V_5$  bez  $R_1$ ) a kompenzační kapacita má velikost 40 nF. Vstupní napětí  $V_{IN}$  má velikost 1 V a tomu odpovídající velikost proudu zatěžovaného zdroje 4,83 A.



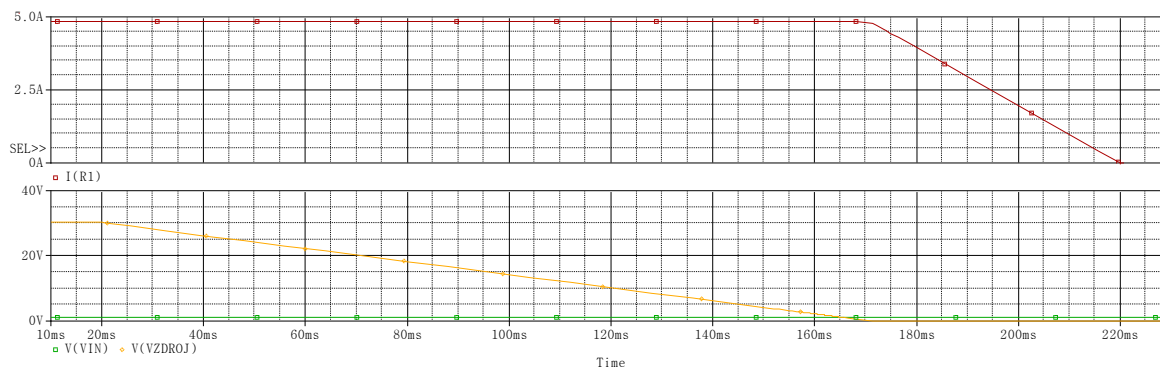
**Obr. 21 Skoková změna napětí zatěžovaného zdroje**

Z grafu (obr. 21) vidíme, že náhlá změna napětí vyvolá derivační odezvu změny proudu. Tedy proud prudce vyskočí (se sníží) a potom se zpět ustálí na předchozí nastavenou úroveň. Doba ustálení se pro vzestupnou i sestupnou hranu pohybuje okolo hodnoty 40  $\mu\text{s}$

(chyba 1%). Špičky proudu v simulaci dosahovaly 14,216 A a -3,7313A (kvůli kapacitám MOSFETŮ).

#### 5.1.4 Pomalá změna napětí na zatěžované zdroji

Tato simulace znázorňuje například vybíjení akumulátoru konstantním proudem o velikosti 4,8 A ( $V_{IN} = 1$  V). Napětí zdroje  $V_5$  naprázdno je 40 V a klesne na nulu za 200 ms. Díky vnitřnímu odporu zdroje ( $2\ \Omega$ ) je na grafu (obr. 22) vidět že nejvyšší dosažené napětí je asi 30V. Napětí začíná klesat až od času 20 ms (nastavení pulzního zdroje).

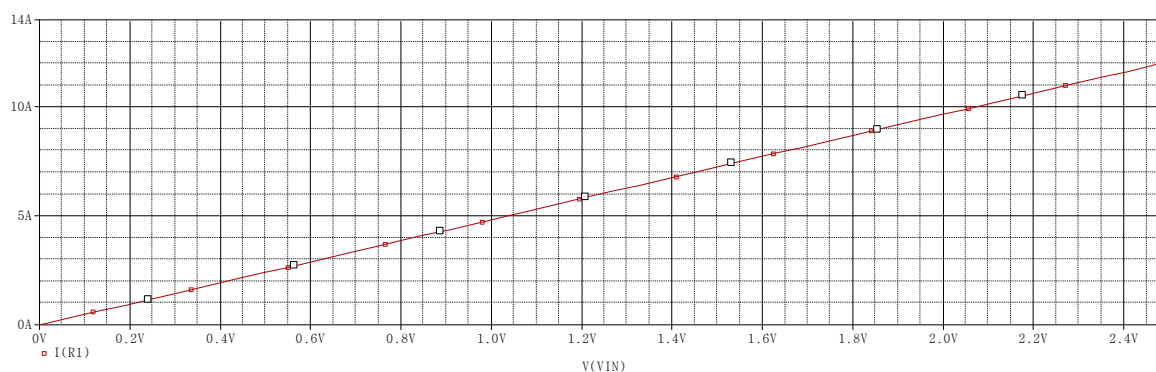


Obr. 22 Vliv pomalé změny napětí zatěžovaného zdroje na nastaveném proudu

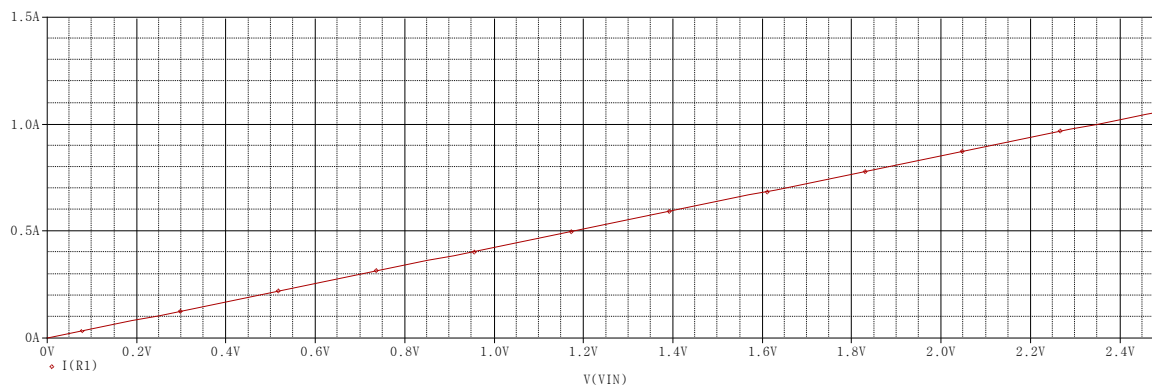
Proud zátěže se drží na konstantní hodnotě 4,8A až do času 171,321 ms, kde se charakteristika láme a proud zátěží lineárně klesá spolu s napětím zdroje. Napětí zdroje je v tomto případě zlomu 138,441 mV. Lineární klesání je způsobeno dosažením minimálního odporu elektronické zátěže (28,7 m $\Omega$ ). Tedy zdroj nemá již dostatek energie pro udržení daného proudu.

#### 5.1.5 Přenosové charakteristiky proudu zdroje na vstupním napětí $V_{IN}$

Zátěž má pro proudový režim možnost výběru dvou rozsahů. První je 10 A ( $R_8 = 110$  k,  $R_9 = 13$  k3) a pro zvýšení citlivosti pro malé proudy ještě 1 A ( $R_8 = 122$  k,  $R_9 = 1$  k3). Oba rozsahy jsou říditelné napětím  $V_{IN}$  v rozsahu 0 až 2,5V. Oba rozsahy jsou mírně předimenzované, aby bylo možno pominout toleranci součástek. V prvním rozsahu se dá teoreticky dosáhnout až 11,810 A na 2,5 V (viz. obr. 23). Ve druhém 1,0648 A (viz. obr. 24).



Obr. 23 Přenosová charakteristika  $I_1=f(V_{IN})$  pro rozsah 11.5A

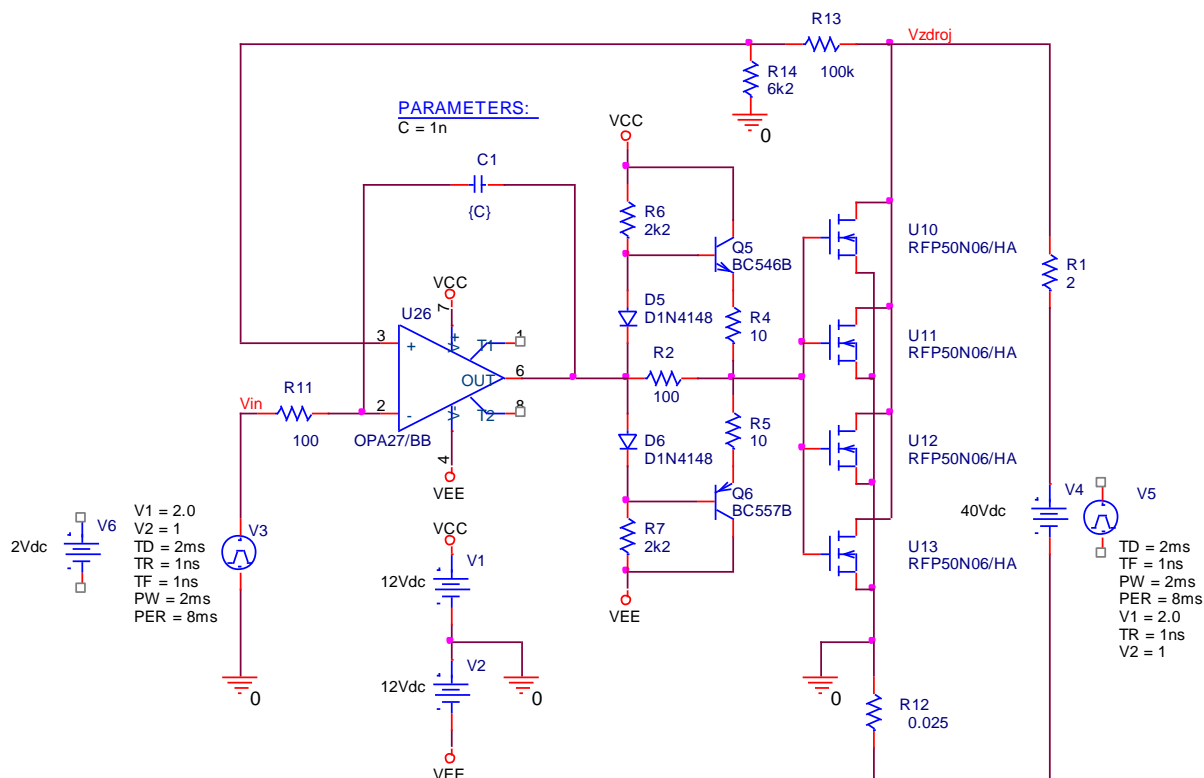
Obr. 24 Přenosová charakteristika  $I_1=f(V_{IN})$  pro rozsah 1A

Tyto průběhy však platí jen pro zdroje s dostatečně malým vnitřním odporem, které dokážou dodat dostatečný proud, a neklesne jim napětí pod již zmiňovaných 131,441 mV. Ve skutečnosti však toto napětí bude větší, protože se projeví ještě navíc odpory přírodních vodičů a cest.

## 5.2 Režim konstantního napětí

### 5.2.1 Schéma simulace

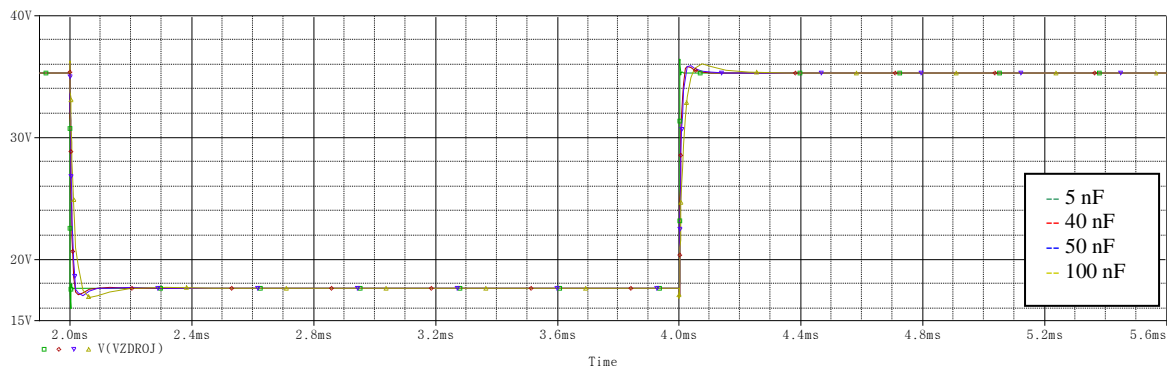
Pro režim konstantního napětí (obr. 25) se uplatní hlavní regulační větev a napěťová zpětná vazba tvořená odpory  $R_{14}$ ,  $R_{13}$ . Oproti režimu konstantního proudu (obr. 19) je zpětná vazba napojena na neinvertující vstup rozdílového zesilovače a řízení na invertující. Napětí z AD převodníku je simulováno opět napěťovým zdrojem  $V_3$  a  $V_6$ . Zatěžovaný zdroj je simulován napěťovým zdrojem  $V_4$  a  $V_5$ . Odpor  $R_1$  je vnitřním odporem těchto dvou zdrojů.



Obr. 25 Simulační schéma režimu konstantního napětí

### 5.2.2 Skoková změna řídicího napětí $V_{IN}$ a kapacity $C_1$

Touto simulací si můžeme prověřit chování zátěže při skokové změně řídicího napětí. Na obr. 26 vidíme vliv kompenzační kapacity  $C_1$  na ustálení obvodu v závislosti na skokové změně vstupního napětí. Skokové napětí na vstupu je definováno jako změna napětí  $V_{IN}$  z 2 V na 1V za 1ns. Napětí zdroje potom odpovídá napětí 35,335 V a 17,668V. Doba ustálení je definována jako nepřesnost  $\pm 1\%$  od ustálené konečné hodnoty po skokové změně. Proud je snímán z vnitřního odporu  $R_1$  testovaného zdroje. Odpor  $R_{11}$  nahrazuje odpor přepínače a jeho velikost je přibližně 100  $\Omega$ .

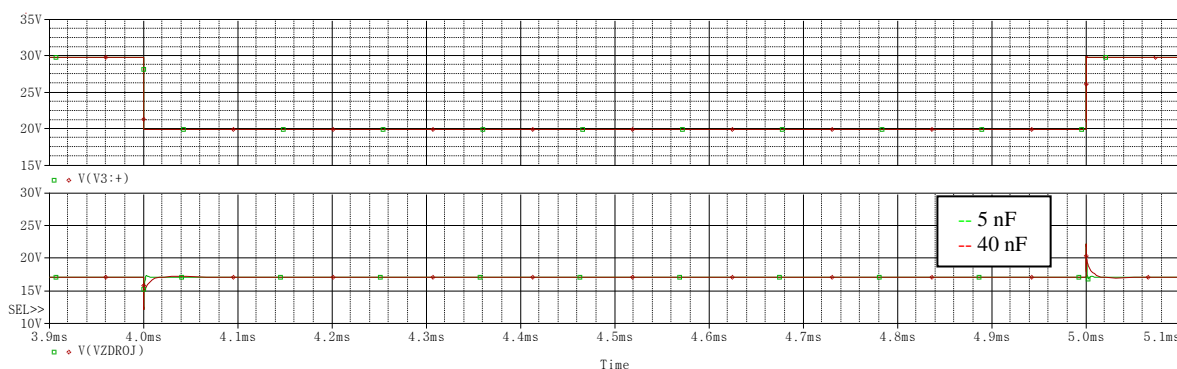


Obr. 26 Závislost skokové změny napětí  $V_{IN}$  na ustálení výstupního napětí

Z grafu vidíme (obr. 26), že oproti proudovému režimu nedochází při kapacitě 5 nF k velkým překmitům ale doba ustálení se velmi zkrátí. Postupně jak jsou uvedeny kapacity 5 nF, 40 nF, 50 nF a 100nF jim odpovídá doba ustálení 3  $\mu$ s, 41  $\mu$ s, 53  $\mu$ s a 134  $\mu$ s. Pro kapacitu 100 nF se doba více než zdvojnásobila. Pro další simulace budeme uvažovat kompenzační kapacitu 40 nF.

### 5.2.3 Skoková změna napětí na zatěžovaném zdroji

V této simulaci (obr. 27) opět můžeme sledovat vliv skokové změny napětí zdroje  $V_3$  z 30 V na 20 V a zpět na velikost napětí určovaného zátěží 17,140 V ( $V_{IN} = 1$  V). Zde je test pro 2 kapacity 5 nF a 40 nF. Pro první byla ze simulace určena doba ustálení 3,28  $\mu$ s a pro druhou 14  $\mu$ s. Tedy doba ustálení je mnohem lepší než v případě proudového režimu.



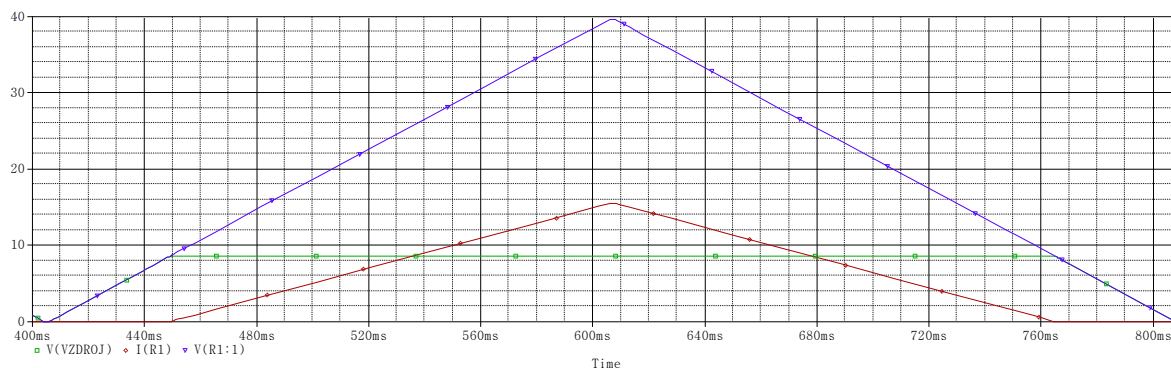
Obr. 27 Skoková změna napětí zatěžovaného zdroje

### 5.2.4 Vliv pomalé změny napětí na zatěžovaném zdroji

V grafu (obr. 28) je znázorněno chování zátěže při postupném zvyšování a snižování napětí zatěžovaného zdroje  $V(R1:1) = V_5$  (bez  $R_1$ ). Vstupní napětí je nastaveno na 1 V a odpovídá mu hodnota na výstupu 8,57 V. Dosáhne-li napětí zatěžovaného zdroje stejné nebo menší velikosti jako nastavené začne nastavené napětí zátěže také klesat. V těchto oblastech zátěž neodebírá téměř žádný proud. Nevýhodou tohoto režimu je, že nastavením



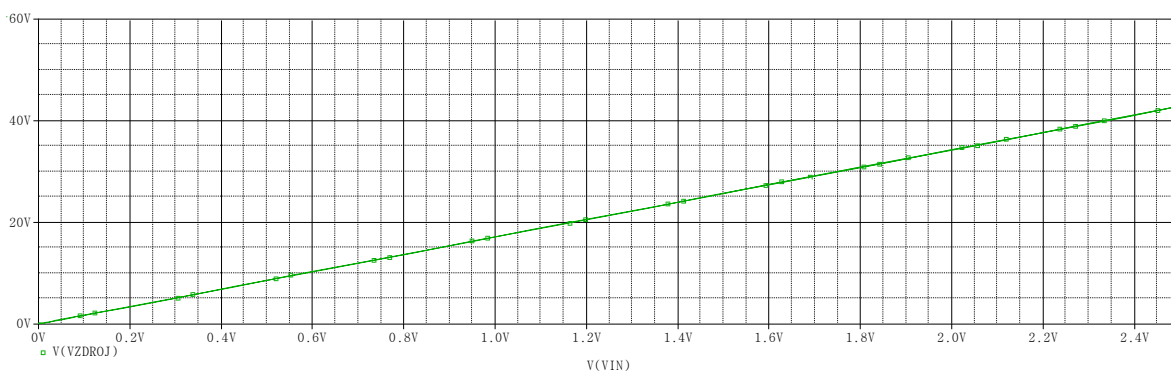
nevhodného napětí můžeme překročit mezní proud zátěže (10 A) a tomu je nutno předejít. Velikost proudu závisí na vnitřním napětí zatěžovaného zdroje a jeho vnitřním odporu. Tento problém bude řešen mikroprocesorovou jednotkou.



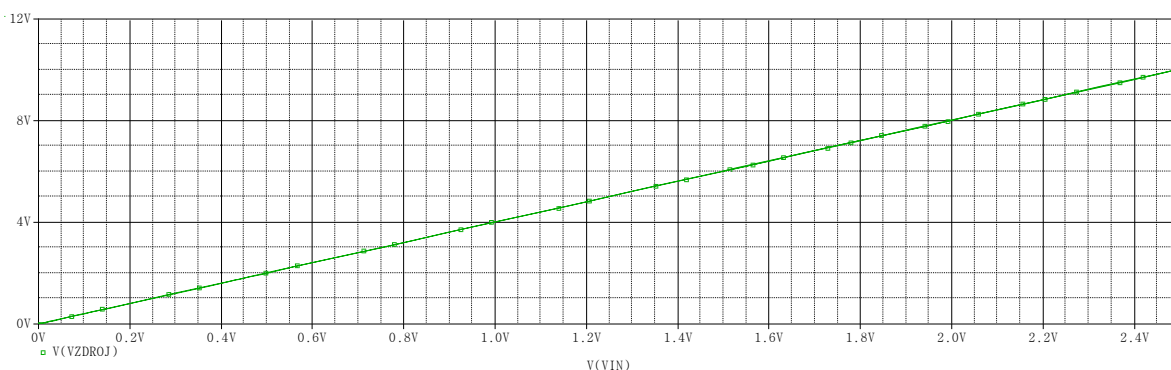
Obr. 28 Vliv pomalé změny napětí zatěžovaného zdroje na nastaveném napětí zátěže

### 5.2.5 Přenosové charakteristiky napětí zdroje na vstupním napětí $V_{IN}$

Stejně jako režim konstantního proudu má režim konstantního napětí také 2 rozsahy pro nastavení citlivosti a přesnosti měření. Na obr. 29 vidíme přenosovou charakteristiku zátěže pro rozsah 40 V. Pro nastavení maximálního napětí musí zůstat nějaká rezerva kvůli přesnosti odporů děliče napětí. Pro tento rozsah je řídicí napětí v rozmezí 0 V až 2,325 V. Maximální dosažitelné napětí je napětí zatěžovaného zdroje naprázdno. Na obr. 30 je znázorněna charakteristika pro rozsah 10V. Zde se řídicí napětí  $V_{IN}$ , pro dosažení požadovaného výstupního napětí, pohybuje v rozmezí od 0 V do 2.5 V.



Obr. 29 Přenosová charakteristika  $U_{ZDROJ}=f(V_{IN})$ , rozsah 40V

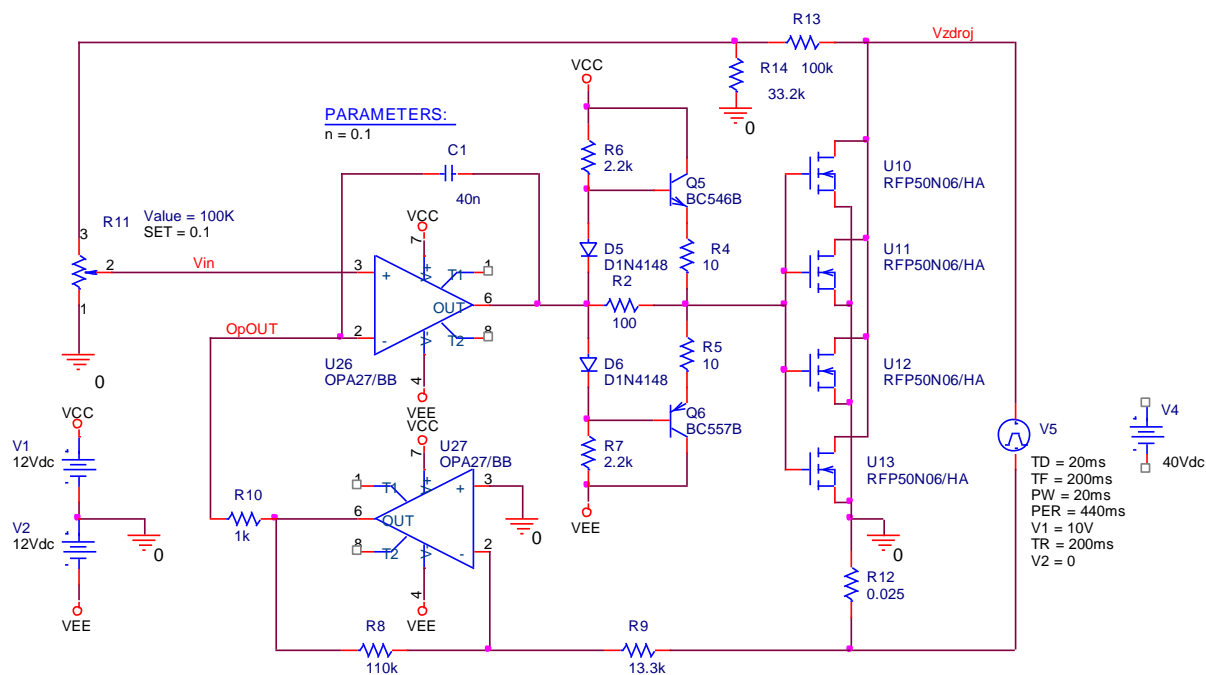


Obr. 30 Přenosová charakteristika  $U_{ZDROJ}=f(V_{IN})$ , rozsah 10V

## 5.3 Režim konstantního odporu

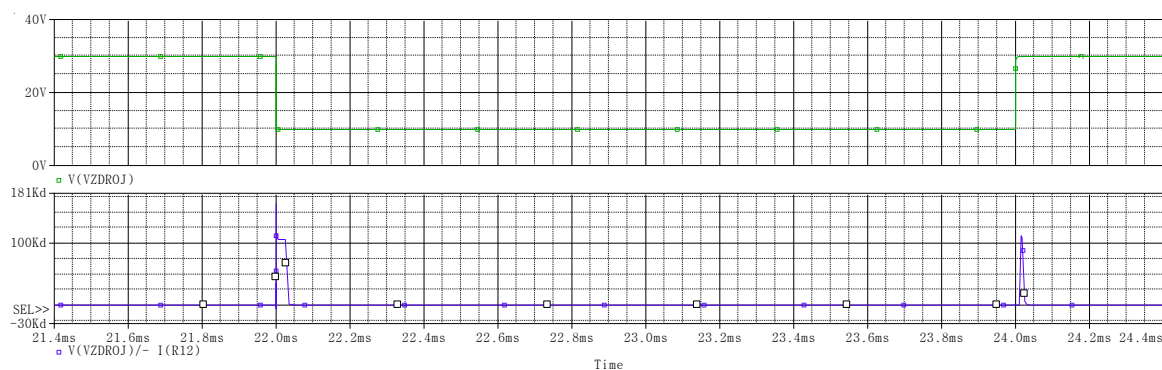
### 5.3.1 Schéma simulace

Tento režim je z výše uvedených dvou režimů nejnáročnější, protože v sobě mimo hlavní regulační větve kombinuje proudovou i napěťovou zpětnou vazbu (viz. obr. 31). Proudová vazba je napojena na invertující vstup a napěťová je připojena na potenciometr, který v tomto případě zastupuje D/A převodník. Kontakt jezdce je přiveden na neinvertující vstup rozdílového zesilovače. Změnou nastavení jezdce se nastavuje výsledný odpor. Ideálně by měl být potenciometr od napěťové vazby oddělen, aby se neovlivňovaly, ale po několika pokusech se to v programu PSpice nepodařilo tímto způsobem odsimulovat. Proto je tato simulace nejméně přesná a nejméně odpovídá realitě. Pro tento režim taktéž není uvedena simulace skokové změny vstupního napětí  $V_{IN}$  z důvodu realizovatelnosti.



Obr. 31 Simulační schéma režimu konstantního odporu

### 5.3.2 Vliv skokové změny napětí na straně zátěže



Obr. 32 Vliv skokové změny napětí zatěžovaného zdroje na nastavený odpor zátěže

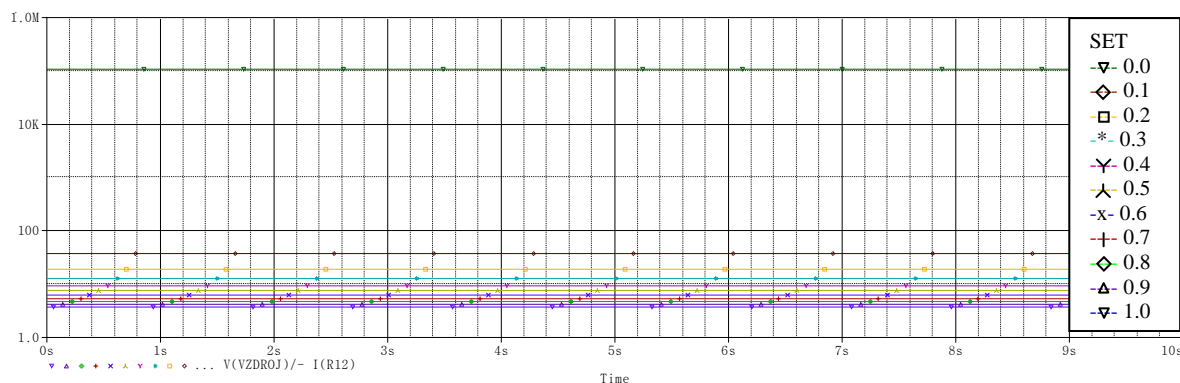
Na obr. 32 je vidět vliv skokové změny napětí zatěžovaného zdroje. Skokové napětí se měnilo mezi 30 V a 20 V ve vzestupné a sestupné hraně o délce trvání 10ns a kompenzační kapacita byla nastavena na  $C_1 = 40$  nF. Výsledný průběh odporu je počítán z napětí zdroje a proudu procházejícího měřícím rezistorem  $R_{12}$  a je zobrazen ve spodní části obrázku. Při



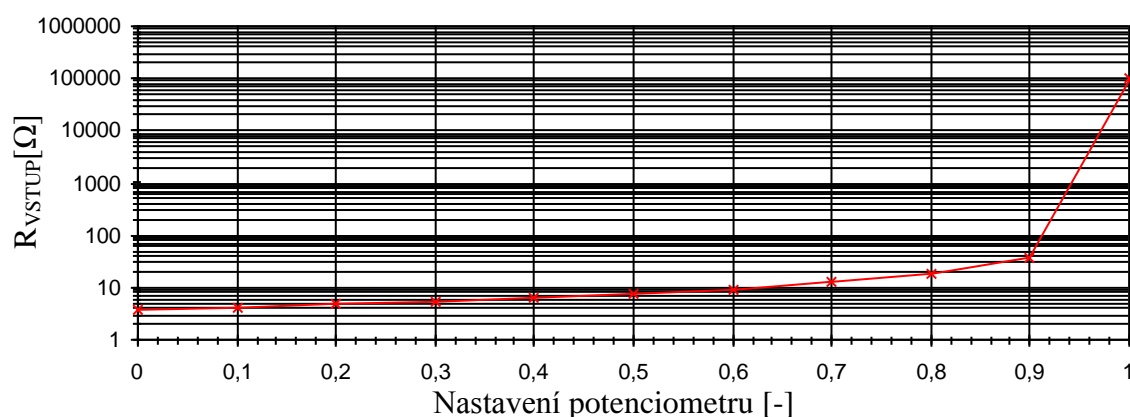
skokové změně napětí opět dochází k rušivým špičkám sahajícím do maximálních mezních hodnot odporu zátěže. Doba ustálení pro obě hrany je 50  $\mu\text{s}$ .

### 5.3.3 Vliv nastavení potenciometru na výstupním odporu

Na obr. 33 je vidět velikost odporu v závislosti na nastavení jezdce potenciometru (SET). Poloha SET = 0,0 je spojena se zemí a dále se mění po kroku 0,1 až do hodnoty 1 (druhá krajní poloha potenciometru). Potenciometr použitý v simulaci je lineární. Z obr. 33 je vidět, že jednotlivé skoky vyvolávají různě se zvyšující odchylku. Závislost nastavení polohy jezdce potenciometru a výstupního odporu je silně nelineární (viz. obr. 34). Nejdůležitější vlastností je zde však stálost nastaveného odporu v čase.



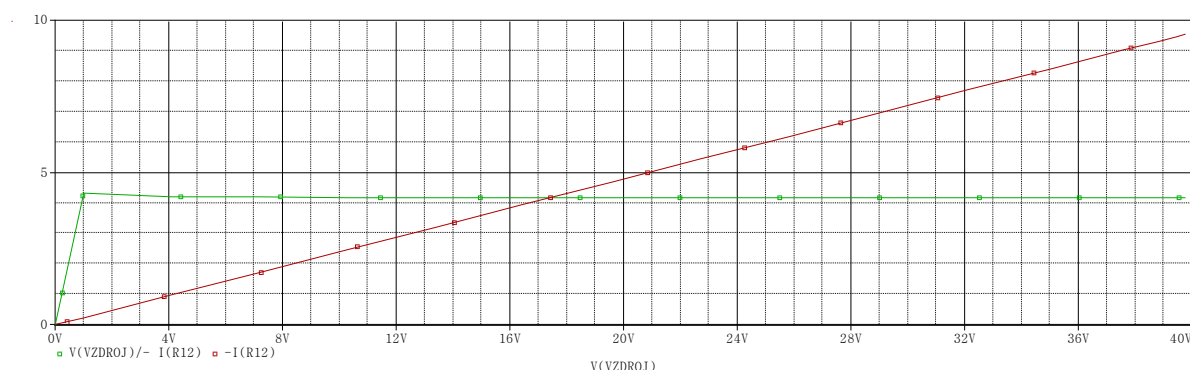
Obr. 33 Vliv nastavení potenciometru na výstupním odporu zátěže



Obr. 34 Závislost odporu zátěže na nastavení potenciometru

### 5.3.4 Pomalá změna napětí na zatěžovaném zdroji

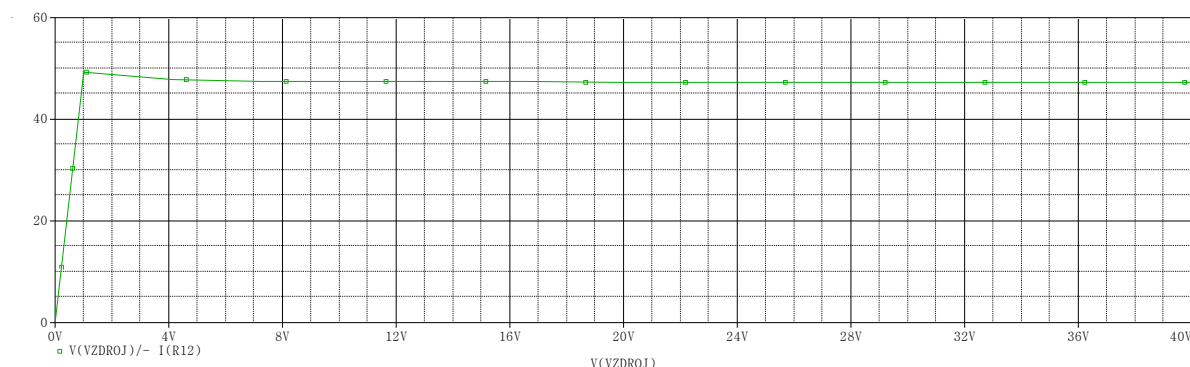
Pro nastavení odporu máme v tomto režimu na výběr ze 4 možných rozsahů vytvořených kombinací rozsahů napěťové a proudové smyčky. Každá se vyznačuje určitou dominantní vlastností a možností použití. Strmý růst (klesání) (obr. 35, obr. 36, obr. 37, obr. 38) pod 1 V nebo 300 mV (podle zvoleného rozsahu) je způsobeno velkým ovlivněním vstupních veličin neinvertujícího vstupu, které se pohybují v krajních mezích použitelnosti. Mírné klesání pro napětí větší jak 300 mV nebo 1 V odporové charakteristiky je způsobeno již menším ovlivněním těchto veličin. V praxi by měla být situace příznivější. Přesný průběh bude nutno změřit na hotovém zařízení. Potenciometr je ve všech následujících simulacích nastaven na hodnotu SET = 0,1. V tomto režimu se nemusíme bát, že proud přesáhne mezní hodnotu dovoleného proudu jako u napěťového režimu.



Obr. 35 Závislost nastaveného odporu na napětí zdroje, rozsah 10A/40V

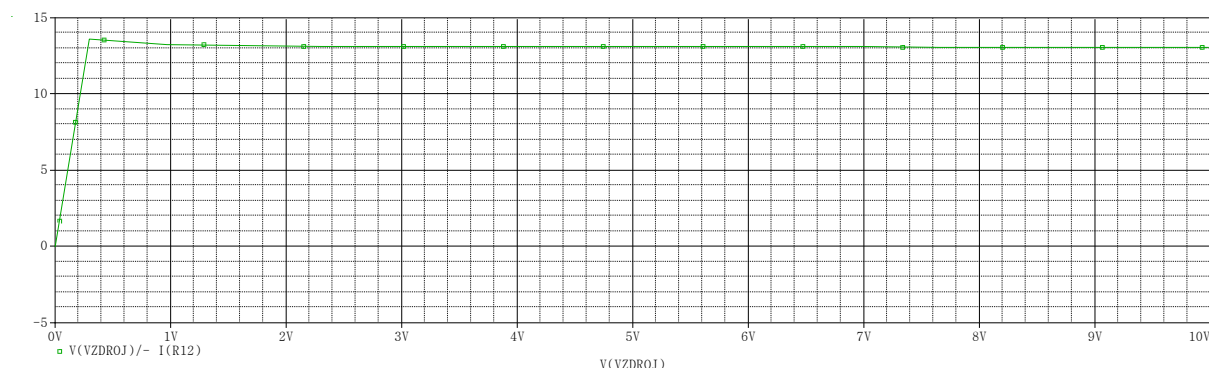
Na prvním obrázku (obr. 35) je závislost nastaveného odporu na napětí zdroje pro rozsah 10A/40V. Minimální dosažitelný odpor je 3,7514  $\Omega$  a maximální 105 k $\Omega$ . Minimální napětí, při kterém obvod ještě pracuje správně pro rozsah 40V je v simulaci určeno na 1V. Ve skutečnosti se bude muset určit měřením hotového přístroje. Proudový rozsah toto napětí, s přihlédnutím na obr. 36, nijak neovlivňuje.

Na druhém obrázku (obr. 36) je zmenšen proudový rozsah na 1A. Tato změna ovlivnila minimální dosažitelný odpor na 42,569  $\Omega$ . Maximální dosažitelný odpor na rozsahu 1A/40V zůstal nezměněn na 105 k $\Omega$ .



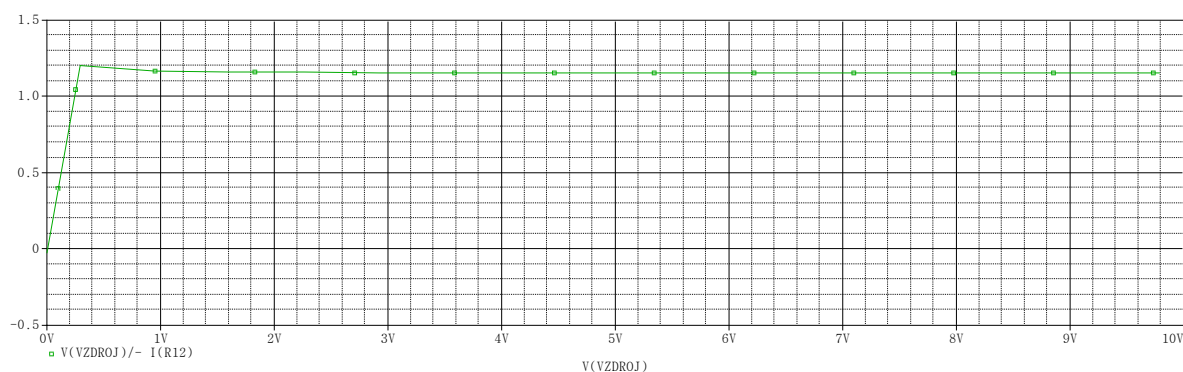
Obr. 36 Závislost nastaveného odporu na napětí zdroje, rozsah 1A/40V

Změnou rozsahu na hodnotu 1A/10V má vliv na dosažitelné mezní hodnoty odporu. Maximální dosažitelný odpor se změnil na 125,124 k $\Omega$  a minimální na 13,099  $\Omega$ . Taktéž se změnilo i minimální napětí pro správnou funkci obvodu a to na 300 mV (obr. 37). Tento rozsah lze použít jen pro zdroje s napětím menším jak 10V.



Obr. 37 Závislost nastaveného odporu na napětí zdroje, rozsah 1A/10V

Poslední kombinace, která zbývá je rozsah 10A/10V. Tento rozsah umožňuje dosáhnout nejmenšího možného odporu a to 1,0375  $\Omega$ . Maximální zůstává zachován na hodnotě 125 k $\Omega$ . Opět je tento rozsah určen jen pro zdroje s napětím menším jak 10V.



Obr. 38 Závislost nastaveného odporu na napětí zdroje, rozsah 10A /10V

## 5.4 Shrnutí výsledků simulace

V simulacích jsme si ověřili teoretickou funkčnost zařízení a přibližné parametry, kterých zátěž může teoreticky dosáhnout. V praxi ovšem budou výsledky trochu odlišné z důvodu neuvažování veškerých parametrů nastavení, parazitních odporů (vodičů,...) a samotné simulační modely součástek taktéž neobsahují úplně přesné popisy. Proto je následující parametry brát s určitou rezervou. Nejméně budou odpovídat parametry režimu konstantního odporu.

Tabulka 3: Parametry zátěže získané simulací

Simulace		Proudový režim	Napětový režim	Odporový režim
Doba ustálení (skoková změna řízení) <sup>*7)</sup>	μs	46,1	41	-
Doba ustálení (skoková změna zdroj) <sup>*7)</sup>	μs	40,0	14	50
Rozsah regulace proudu ( $V_{IN} = 0-2,5V$ )	A	0 - 1,065 <sup>*1)</sup> 0 - 11,81 <sup>*2)</sup>	-	-
Rozsah regulace napětí ( $V_{IN} = 0-2,5V$ )	V	-	0 - 10,1 <sup>*3)</sup> 0 - 42,5 <sup>*4)</sup>	-
Rozsah regulace odporu ( $SET = 0.0-1.0$ )	Ω	-	-	42,57 - 105,0k <sup>*1), *4), *5)</sup> 13,10 - 125,1k <sup>*1), *3), *6)</sup> 3,751 - 105,0k <sup>*2), *4), *5)</sup> 1,038 - 125,0k <sup>*2), *3), *6)</sup>

\*1) rozsah 1A, \*2) rozsah 10A, \*3) rozsah 10V, \*4) rozsah 40V

\*5)  $U_{ZATEZ} > 1V$ , \*6)  $U_{ZATEZ} > 300mV$

\*7)  $C = 40nF$ ,  $p = 1\%$

V tabulce 3 jsou uvedeny výsledky simulace. Doba ustálení pro všechny režimy se pohybuje kolem 45 μs. Jen u napětového režimu klesla na 14 μs při skokové změně napětí zdroje.

U režimu konstantního napětí je nutné předejít možnosti překročení maximálního dovoleného proudu. Rozsah regulace zde tedy bude od napětí při maximálním dovoleného proudu do vnitřního napětí zdroje. Nutno znát vnitřní odpor zdroje (problém se ošetří softwarově) nebo hlídat velikost proudu pomocí komparátoru. U ostatních režimů překročení maximálního proudu nehrozí.

V režimu konstantního odporu je zdroj omezen minimálním nejnižším napětím, při kterém zátěž ještě bude fungovat správně. Platí to ovšem jen pro zdroje, které budou schopny dodat do zátěže při daném napětí dostatečný proud (platí i pro proudový režim). Skutečnou velikost minimálního napětí a rozmezí regulace odporu bude určena až při realizaci a měření zátěže, protože tento režim nebyl zrovna simulován korektně.

## 6 Realizace konstrukce

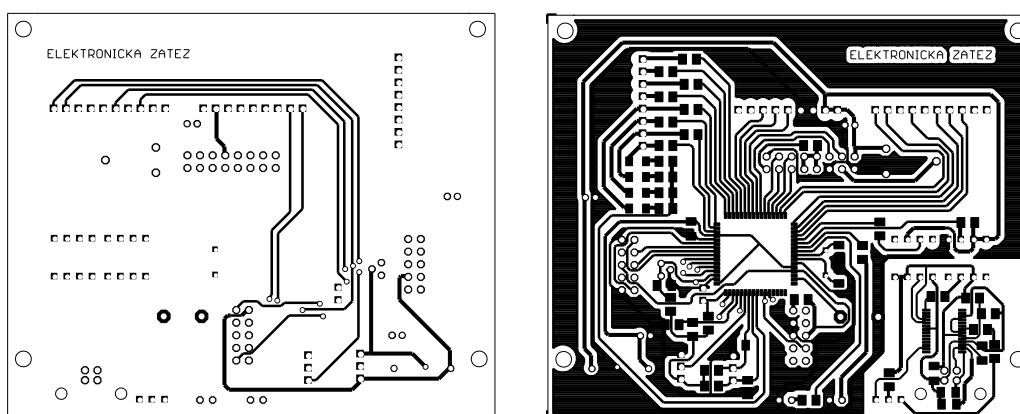
Zadání práce obsahuje kompletní návrh elektronické zátěže od schématu až po samotný funkční přístroj. V této kapitole je popsána fyzická a programová realizace zátěže.

### 6.1 DPS

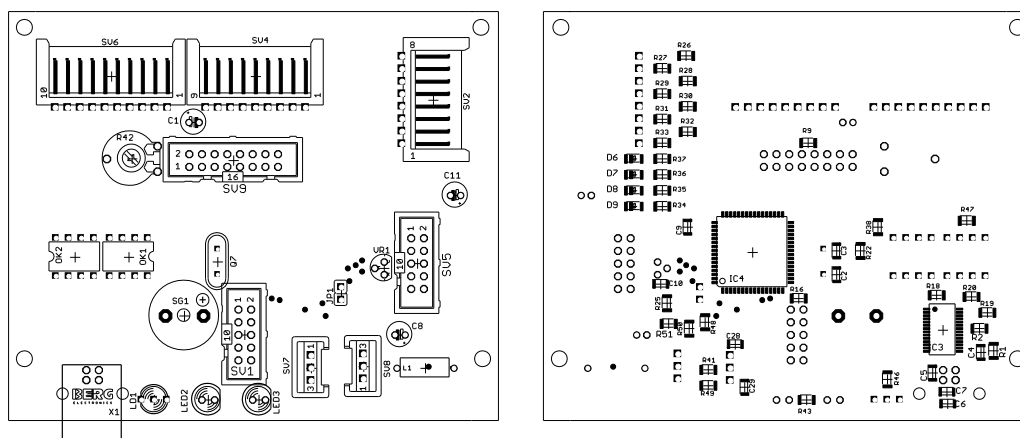
Elektronická zátěž se sestává ze tří základních desek plošných spojů a to procesorové, výkonové a napájecí. Jednotlivé návrhy plošných spojů byly provedeny v návrhovém systému Eagle 5.10.0 s omezenými rozměry na max. Euro desky, a proto je zátěž rozdělena na tři části. Jednotlivé uvedené DPS jsou vzájemně propojeny kabely s konektory se zámkem a konektory typu FASTON.

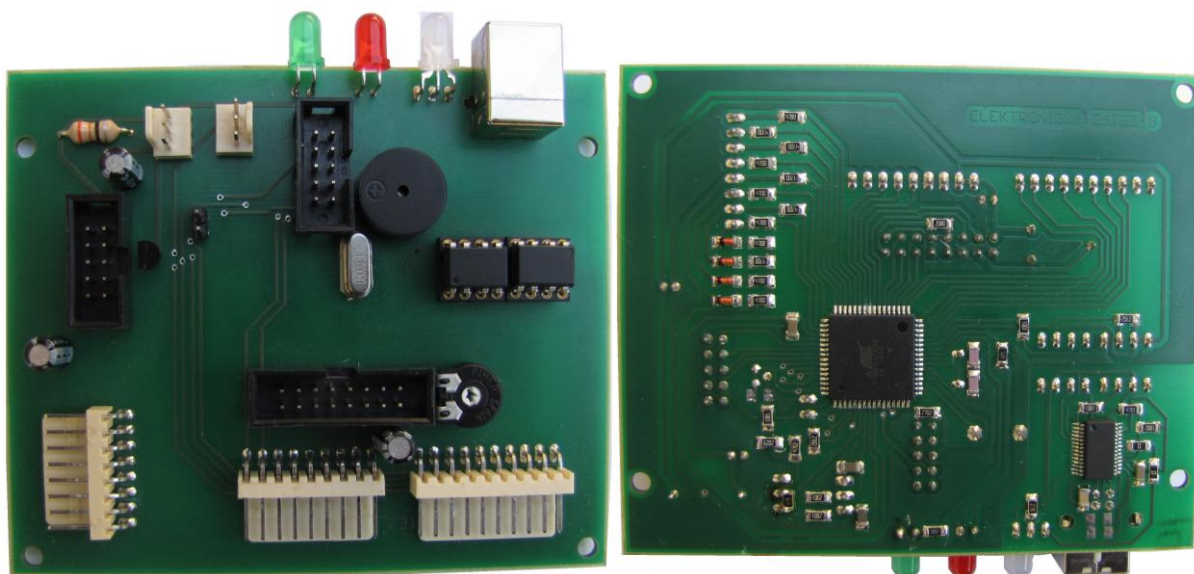
#### 6.1.1 Procesorová DPS

Procesorová deska byla nechána vytvořit profesionálně jako oboustranná DPS s prokovy, nepájivou maskou a pocínovanými pájecími kontakty. Velikost desky je 99x82 mm. Deska je osazena dvojím typem součástek SMD (ze spodní strany)(viz. obr. 40 vpravo) a součástkami s drátovými vývody (viz. obr. 40 vlevo). Na obr. 39 jsou zobrazeny vodivé cesty procesorové desky. V pravém obrázku lze vidět opticky oddělený obvod (přes OK1 a OK2) připojení USB, který chrání PC před nežádoucím vnikem případného napětí při poruše přístroje. V poslední dvojici obrázků (obr. 41) lze vidět již osazenou procesorovou desku z obou stran a konektory pro propojení desek a externích součástek (displej, klávesnice, ...).



Obr. 39 Procesorová DPS – spoje (vlevo pohled z vrchu, vpravo pohled zespodu)



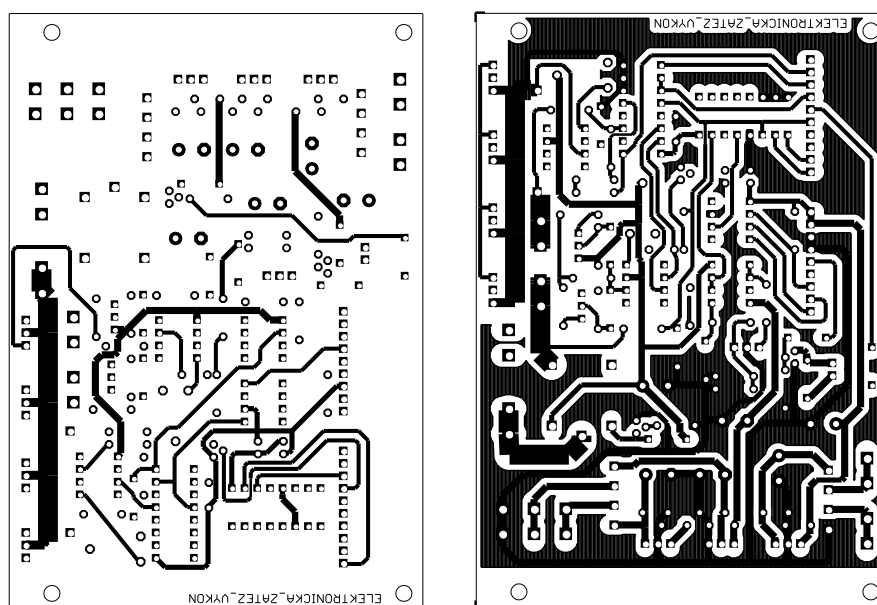


Obr. 41 Procesorová DPS – osazená deska

### 6.1.2 Výkonová DPS

Výkonová deska byla vytvořena také profesionálně jako oboustranná DPS s prokovy, nepájivou maskou a pocínovanými pájecími kontakty. Velikost desky je 82x120 mm. Deska je osazena jen součástkami s drátovými vývody (viz. obr. 43).

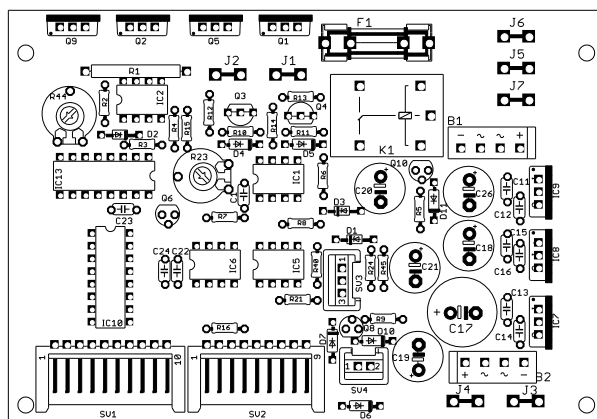
Na obr. 42 jsou zobrazeny vodivé cesty procesorové desky. Všimněme si především silných přívodních cest (tloušťky 4 mm) k MOSFET tranzistorům (v levé části DPS), které musí být kvůli velkému přenosu proudu (až 10 A) pocínovány. Lépe jsou tyto cesty viditelné na kompletně osazených deskách na obr. 44.



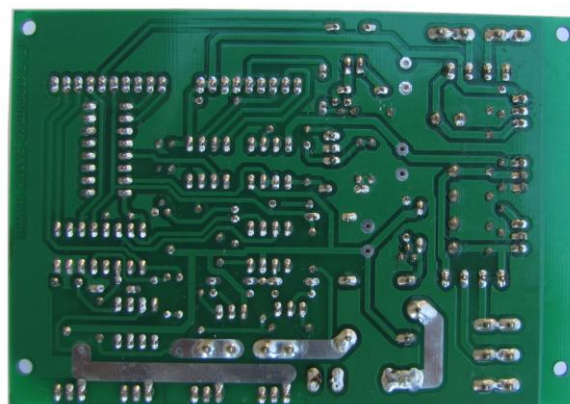
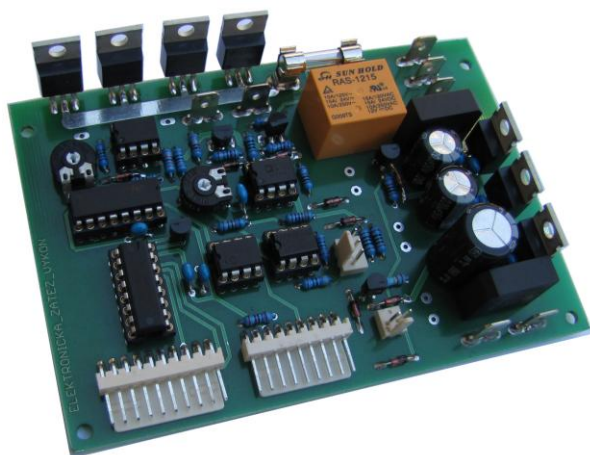
Obr. 42 Výkonová DPS – spoje (vlevo pohled z vrchu, vpravo pohled zespodu)

Na obr. 42 vpravo je také vidět čtyřpólové připojení měřícího rezistoru  $R_1$  (25m $\Omega$ ). To je realizováno přivedením proudové (4 mm) a napěťové cesty přímo k pájecím ploškám rezistoru na DPS.





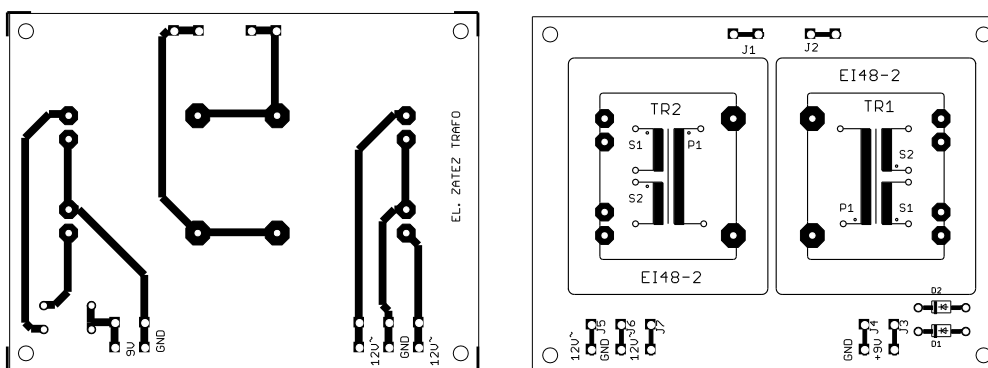
Obr. 43 Výkonová DPS - osazovací plán



Obr. 44 Výkonová DPS – osazená deska

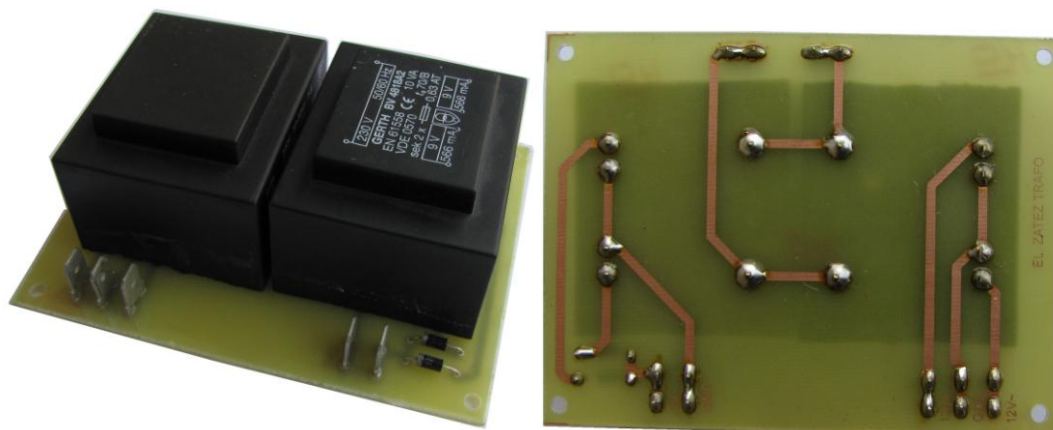
### 6.1.3 Napájecí DPS

Poslední deskou, kterou potřebujeme vytvořit je DPS napájecí. Tato deska obsahuje transformátory typu EI48-2 se sekundárním napětím  $2 \times 9\text{ V} \sim$  o výkonu  $10\text{ VA}$  a  $2 \times 12\text{ V} \sim$ . Deska je vytvořena amatérsky fotocestou jako jednostranná, bez nepájkivé masky, prokovů a pocínovaných kontaktních plošek. Rozměr napájecí desky je  $76 \times 100\text{ mm}$ . Deska se propojuje s výkonovou deskou pomocí konektorů FASTON.



Obr. 45 Napájecí DPS – pohled zespodu a osazovací plán

Na obr. 45 je vidět návrh napájecí DPS (Plošný spoj a osazovací plán) a na poslední dvojici obrázků (obr. 46) již hotová funkční osazená deska.



Obr. 46 Napájecí DPS – osazená deska

Samotné usměrnění a stabilizace napětí jsou provedeny až na desce výkonové (6.1.2). Transformátor se jmenovitým napětím  $2 \times 12V \sim$  je určen pro napájení stabilizátorů  $\pm 12V$ . Druhý transformátor je určen pro napájení procesorové části přístroje. Napětí z tohoto transformátoru je předem jednocestně usměrněno z obou vinutí, aby bylo možno dosáhnout vyššího výkonového zatížení transformátoru.

## 6.2 Konstrukce

Všechny jednotlivé části zařízení jsou naskládány do konstrukční krabice ze starého laboratorního přístroje UNIMA-KS3 o rozměrech  $290 \times 260 \times 110 \text{ mm}$  (Š x H x V). Přední a zadní panel starého přístroje nebylo možné využít a jsou vytvořeny zcela nově.

### 6.2.1 Přední panel

Přední panel je vytvořen podobným způsobem jako v původním přístroji. Na tvrdý papír formátu A4 je vytištěna barevná předloha (příloha č. 3) o rozměrech  $283 \times 102 \text{ mm}$  (Š x V). Tato předloha se ořeže na požadovaný rozměr, zalaminuje a vysekají se vyšrafované části. Zadní strana se nakonec opatří oboustrannou lepicí páskou.



Obr. 47 Hotový přední panel

Pro přední stěnu je nutno dále vytvořit nosnou desku. Jako materiál je použita jednostranná cuprexitová deska o tloušťce 2mm. Do této desky jsou vyřezány otvory podle

předlohy uvedené v příloze (příloha č. 4). Popřípadě lze použít i grafickou předlohu (příloha č. 3), ale otvor pro displej musí být vyřezán i s modrým polem okolo. Měděná vrstva je otočena dovnitř přístroje. Na tuto desku se po vyřezání a mírném zabroušení hran nalepí zalaminovaná grafická podoba předního panelu.

Po zkompletování panelu je nutné ještě přišroubovat BNC konektory (EXT. MODULACE, VÝSTUP I), vstupní svorky (VSTUP), mechanický enkodér (HODNOTA), přilepit klávesnici do pole KLÁVESNICE, vsunout černé průchodky pro 5mm LED (USB, CHYBA, ZÁTĚŽ) a nakonec připevnit displej (natočen vývody nahoru). Hotový přední panel lze vidět na obr. 47.

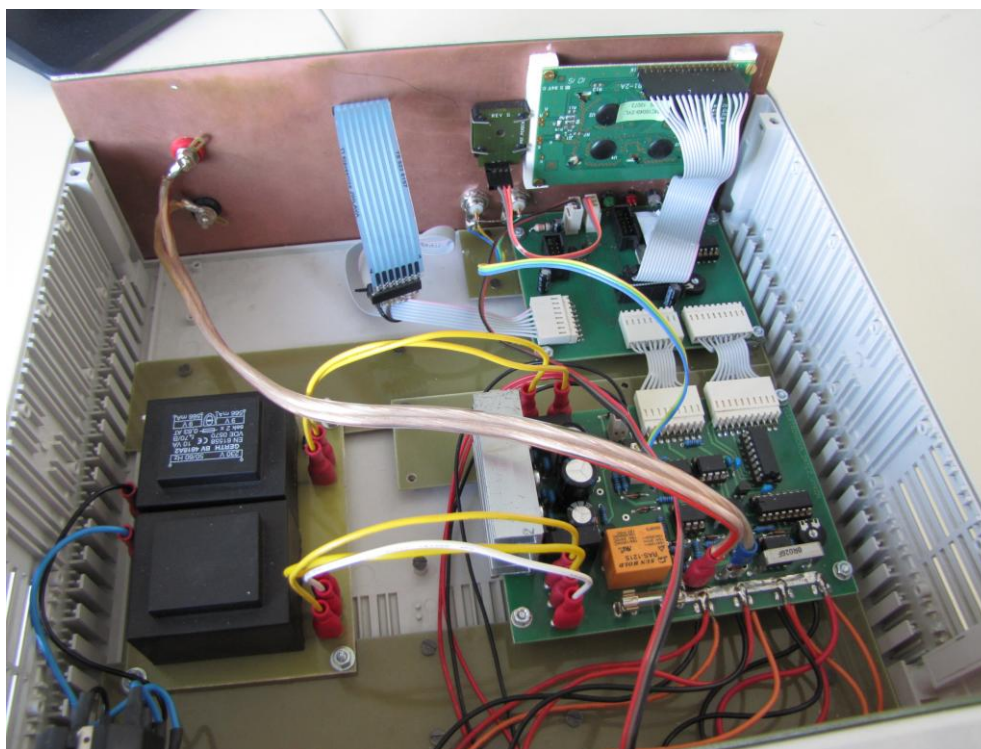
### 6.2.2 Zadní panel

Zadní panel je vytvořen stejným postupem jako přední uvedený v předchozí kapitole (6.2.1). Na tomto panelu je uchycen masivní chladič s ventilátorem a vypínač se síťovým konektorem a pojistkou. Panel je z velké části pokryt plochou chladiče, a proto není nutné ho opatřovat grafickou předlohou. Celkové rozměry zadního panelu lze najít v příloze (Příloha č. 5). Chladič je k panelu připevněn šesti šrouby, rovnoměrně rozloženými v horní a spodní řadě panelu. Síťový konektor je připevněn vlastními plastovými úchytkami zevnitř přístroje.

### 6.2.3 Vnitřní uspořádání přístroje

Na obr. 48 lze vidět vnitřní uspořádání přístroje. Všechny DPS jsou připevněny pomocí šroubů k pomocným cuprexidovým deskám (lze vidět na obr. 48, obr. 49 a obr. 50), kvůli jiným roztečím přichytných bodů konstrukční krabice. Pomocné desky jsou připevněny k plastové konstrukci měděnou vrstvou dolů.

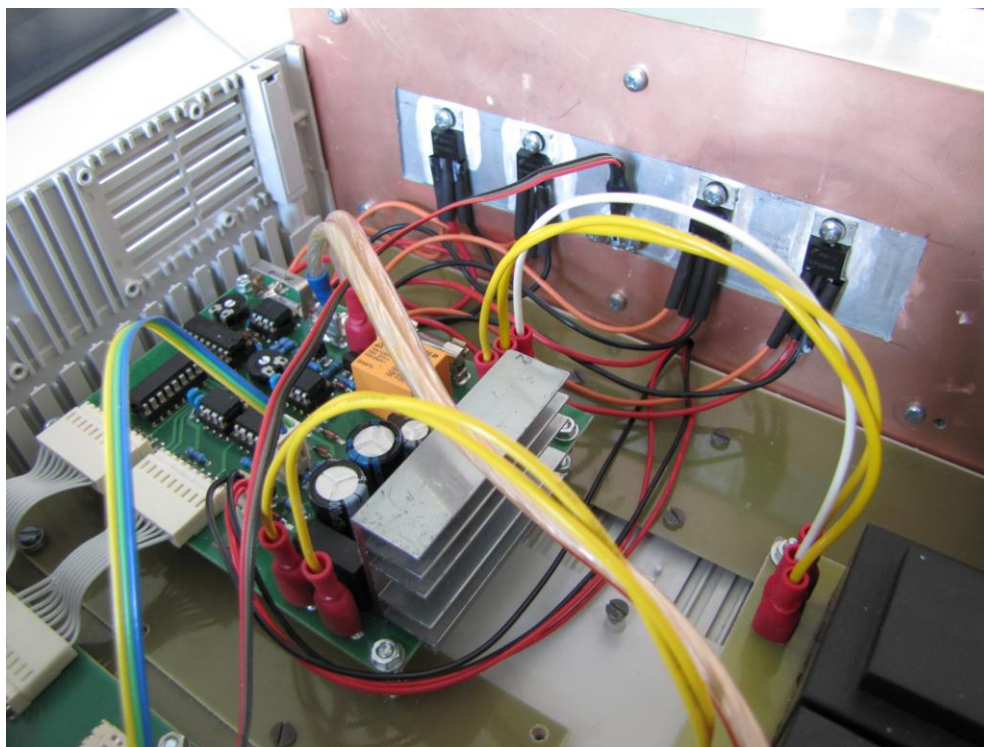
Procesorová deska je umístěna co nejbližší přednímu panelu kvůli USB konektoru a signalizačním LED. Na předním panelu (zezadu) je zde vidět uchycení LCD displeje, encoder a páskový vývod fóliové klávesnice. Dále jsou zde připojeny silové kabely (až pro proud 10 A), které vedou do výkonové desky.



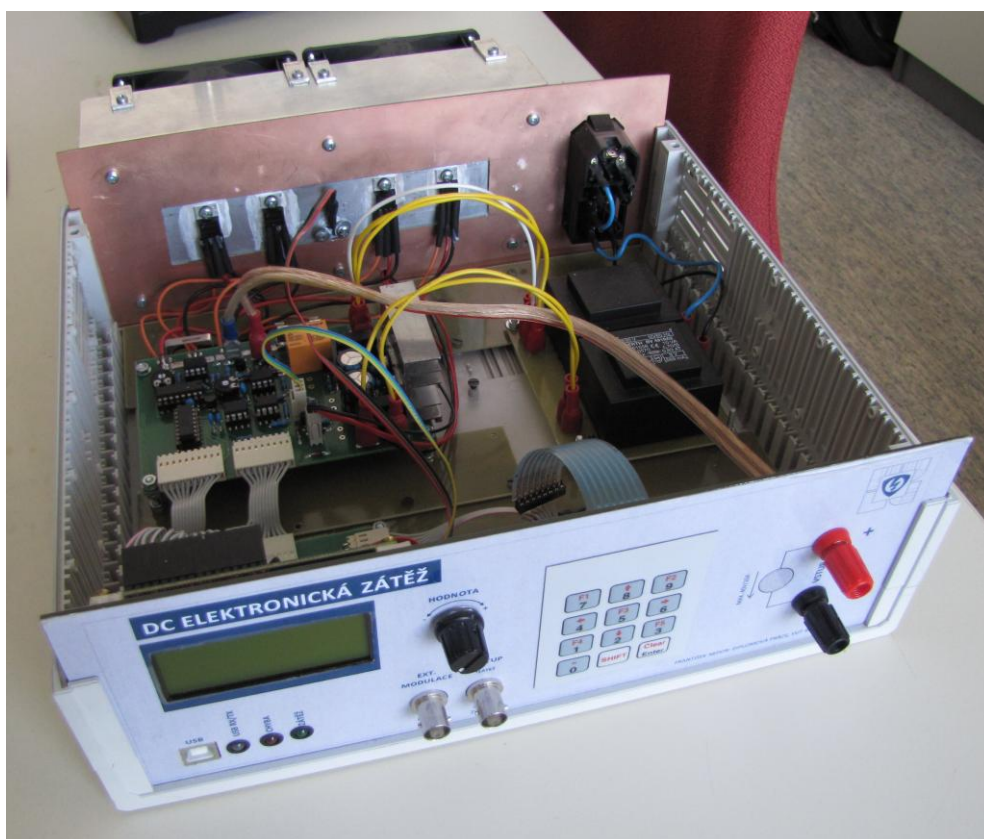
Obr. 48 Zátěž – vnitřní uspořádání (pohled zezadu)



Výkonová deska je položena kvůli výkonovým prvkům nejbližší k chladiči. Z této desky vedou vodiče do napájecí desky (žluté a bílé), páskové vodiče (napájení, signálové a ovládací) do procesorové DPS. Výkonové tranzistory MOSFET jsou k desce připojeny pomocí vodičů (červená, bílá a oranžová). Lépe je vidět připojení MOSFET tranzistorů na obr. 49.



Obr. 49 Zátěž – výkonová deska a upevnění tranzistorů



Obr. 50 Zátěž – vnitřní uspořádání (pohled zepředu)

Na posledním obrázku (obr. 50) je vidět uchycení síťového konektoru (vpravo) a celkový pohled (zepředu do zadu) na otevřený přístroj. Uprostřed mezi MOSFET tranzistory lze vidět i uchycení digitálního teplotního čidla horní uchycení ventilátorů.

Napájecí deska je umístěna v přístroji vpravo a co nejdále od analogové DPS aby nezpůsobovalo případné elektromagnetické vyzařování transformátorů rušení přístroje.

### 6.2.4 Celková hotová konstrukce

Na obr. 51 je vidět elektronickou zátěž ve finální podobě. Vlevo na předním panelu jsou umístěny signalizační prvky (LCD a LED) a USB konektor pro připojení k PC. Ve střední části panelu vidíme ovládací prvky a dva BNC konektory, pomocí kterých můžeme zátěž řídit externím napětím nebo sledovat průběh proudu zatěžovaného zdroje. V pravé části zařízení jsou umístěny svorky pro připojení testovaného zdroje.



Obr. 51 Zátěž – Pohled zepředu na hotový přístroj



Obr. 52 Zátěž – Pohled zezadu na hotový přístroj

Zadní část přístroje ukazuje obr. 52. Je zde vidět masivní chladič chlazený dvěma ventilátory a síťový konektor s vypínačem a pojistkou. Ventilátory jsou připojeny k chladiči pomocí čtyř nosných kovových držáků. Kovové mřížky ventilátoru slouží jako ochrana proti úrazu při dotyku ruky do točících se vrtulí ventilátorů.

## 6.3 Firmware

Pro vytváření firmwaru elektronické zátěže bylo použito vývojové prostředí AVR Studio 4, které umožňuje programovat buď v assembleru, nebo po rozšíření příslušným GNU (nebo i komerčním) nástrojem i v jazyku C. Tento jazyk je pro projekty většího rozsahu přehlednější než assembler a také je zdrojový kód lépe přenositelný na jiný typ procesoru. Pro programování je tedy zvolen jazyk C s optimalizací kódu 0s (na velikost souboru).

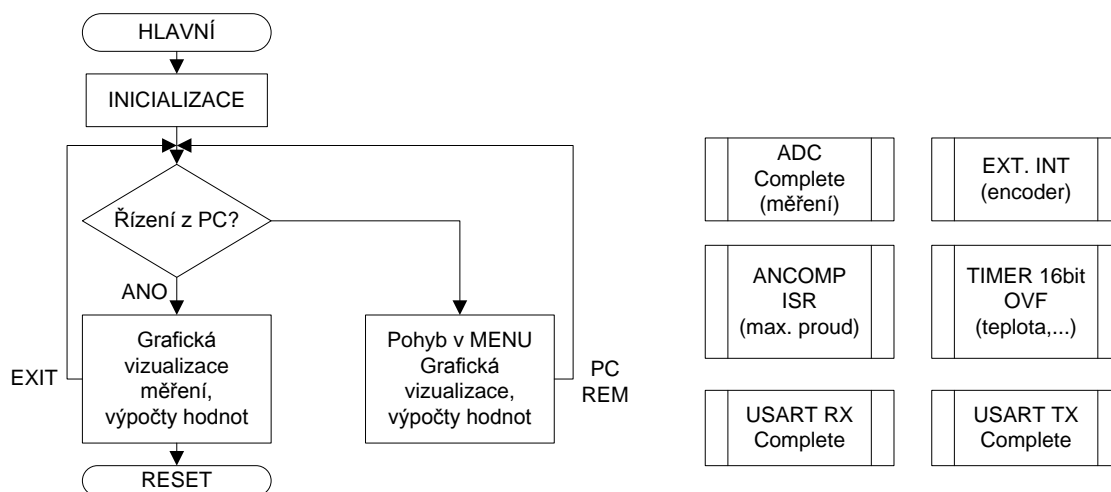
### 6.3.1 Celková skladba programu

Kvůli větší přehlednosti je program rozdělen na více zdrojových souborů (<name>\_c.c). Ke každému zdrojovému souboru náleží i stejnojmenný hlavičkový soubor (<name>\_h.h), ve kterém lze nalézt hlavičky funkcí, definice a makra zdrojového souboru.

Soubor	Význam
elektronicka_zatez_c.c	- hlavní soubor, řídí běh celého programu
ADC_c.c	- obsluha ADC převodníku
keyboard_c.c	- obsluha klávesnice
lcd_c.c	- obsluha LCD displeje
usart_c.c	- příjem/vysílání dat po USART sběrnici
delay_c.c	- zpoždění, čekací smyčky
encoder_c.c	- zpracování dat z rotačního enkodéru
ds18b20_c.c	- obsluha měření teploty
crc8_c.c	- 8 bit crc kontrola dat
onewire_c.c	- obsluha komunikace po 1-Wire sběrnici
mcp4921_c.c	- obsluha D/A převodníku
timer_ms_c.c	- obsluha časovače, kontrola a sběr dat, ochrana.
komparator_c.c	- obsluha komparátoru (překročení max. proudu)
EEPROM_c.c	- obslužné funkce EEPROM paměti
grafika_c.c	- obsluha a pohyb v menu, výpis chyb
serial_c.c	- zpracování sériových dat
signal_c.c	- změna rozsahu, režimu, zapnutí/vypnutí LED, ventilátoru,...

Samotný program lze rozdělit do dvou základních bloků. V prvním bloku se vykonávají algoritmy, u kterých nejsou kladeny nároky na rychlé vykonání a lze z nich kdykoliv přejít do události přerušení. Do této skupiny jsou zařazeny především všechny vizualizační operace (LCD), nastavování hodnot a zátěže pomocí klávesnice, náročnější výpočty a inicializace programu.

Druhý blok se tedy skládá z algoritmů, které slouží především k ochraně a sběru dat zátěže, a proto je nutná rychlá reakce na vybrané události. Rychlé reakce docílíme použitím přerušení na danou událost. Do této skupiny tedy řadíme algoritmy ochranné (hlídání teploty a maximálního proudu), měřicí (A/D převodník), komunikační (čtení/zápis USART) a nastavovací (mechanický rotační encoder).

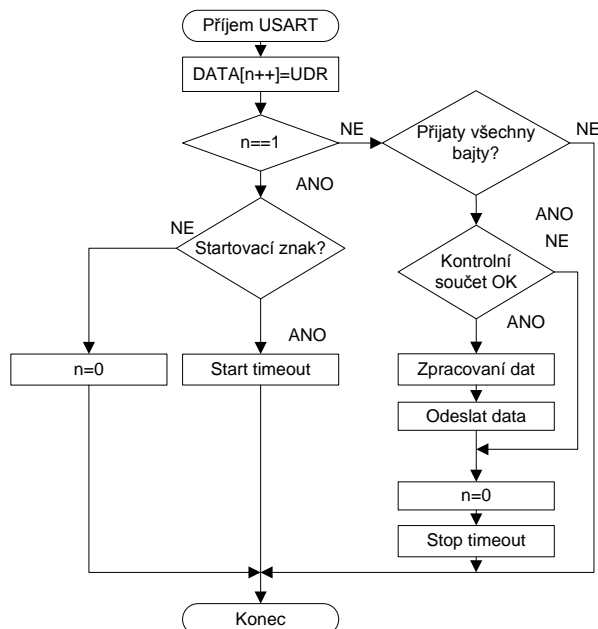


Obr. 53 Názný vývojový diagram firmwaru celé zátěže

Na obr. 53 lze vidět zjednodušený vývojový diagram celého programu zátěže. Po zapnutí přístroje se nejprve provede inicializace procesoru (nastavení portů, ADC, přerušení...) a automaticky se přejde do ručního ovládání. Po příchodu přepínací sekvence dat po USB se manuální režim ukončí a přepne se na dálkové ovládání. V tomto režimu procesor ignoruje všechny nastavovací prvky přístroje. Na obr. 53 vpravo lze vidět jednotlivé události přerušení, které se musí obsloužit co nejrychleji.

### 6.3.2 Vybrané algoritmy

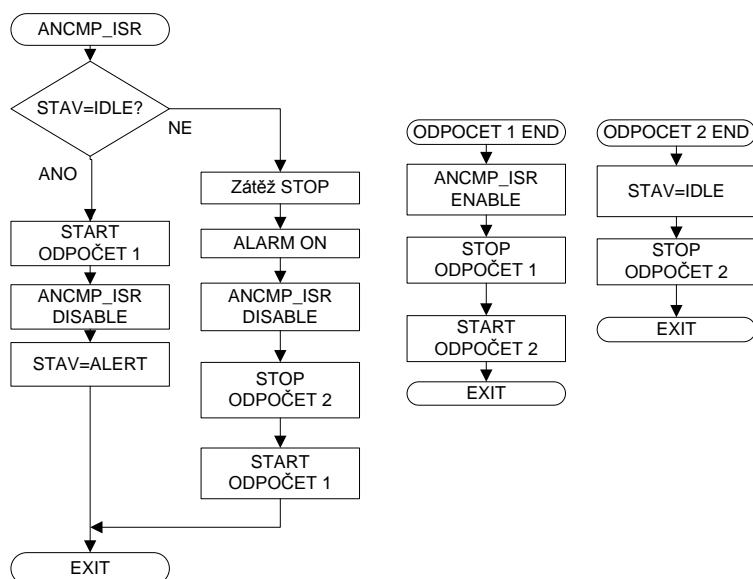
V této kapitole jsou vysvětleny řešení jen některých vybraných částí programu. Jiné části, které zde nebudou uvedeny, jsou k dispozici ve zdrojovém souboru zátěže na přiloženém CD.



Obr. 54 Vývojový diagram příjmu dat z PC

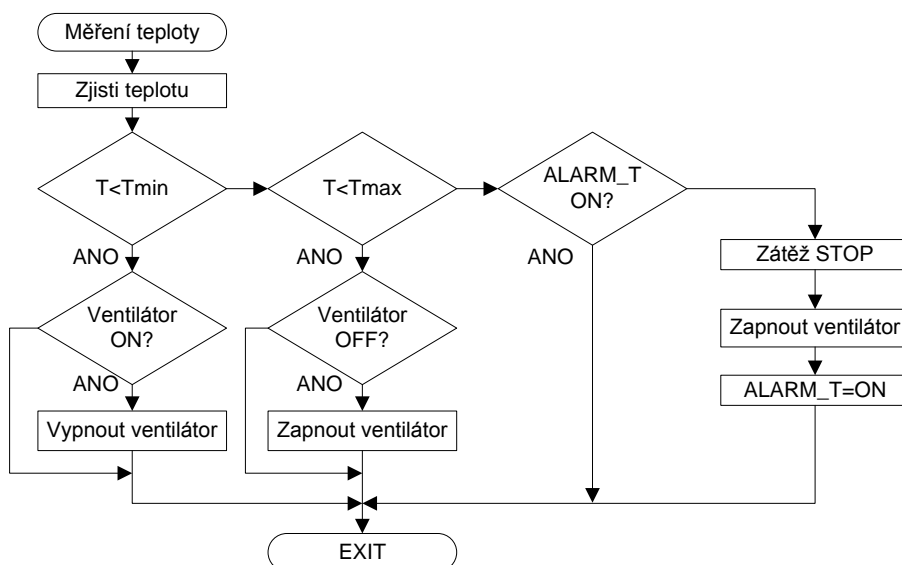
Na obr. 54 je vývojový diagram příjmu dat ze sběrnice USART. Po kompletním příjmu jednoho bajtu se vyvolá přerušení USART a vykoná se obsluha tohoto přerušení. Komunikace s PC je tvořena datovými pakety. Pakety se skládají ze startovacího bytu 0xFF, délky paketu (max. 255), příkazu, případných dat a kontrolního součtu. Program tedy nejprve čeká na startovací symbol. Po příjmu symbolu se spustí časovač „timeout“, který vynuluje přijímací buffer v případě ztráty dat a zamezí tak zaseknutí komunikace s PC. Dále program

čeká na příjem ostatních bajtů, a nakonec je paket podroben kontrole shodnosti kontrolního součtu. Pokud příjem proběhne v pořádku, přijatá data se vyhodnotí a zpět do PC se posílá ihned odpověď. V opačném případě je vynulován přijímací buffer a celá procedura se znovu opakuje.



Obr. 55 Hlídní maximálního proudu

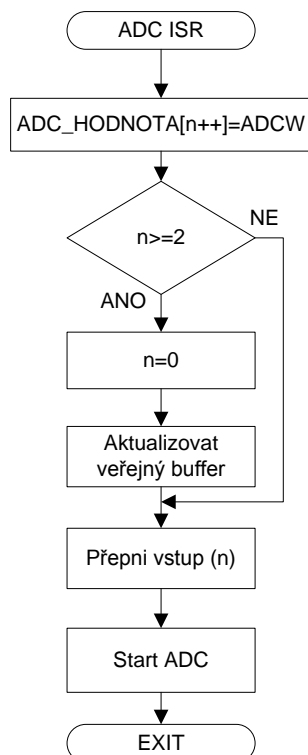
Obr. 55 ukazuje vývojový diagram obsluhy události přerušení od analogového komparátoru. Dojde-li k překročení napětí bloku měření proudu nad přibližně 2,5V, dojde k vyvolání přerušení a vykoná se větev IDLE. Tím se zakáže přerušení od komparátoru, ale povolí se událost ODPOCET 1 END upraveného časovače. Po uplynutí ustalovacího času (eliminace rušivých impulzů při změně hodnoty např. proudu) se tato smyčka vykoná, povolí přerušení komparátoru a spustí časovač ODPOCET 2. Pokud v tuto dobu (do události ODPOCET 2 END) nastane přerušení od komparátoru, vstup zátěže se odstaví. Pokud ne, hlídání proudu přejde zpět do režimu IDLE. Hlídní proudu se uplatní především v režimu konstantního napětí. V jiných režimech by problém nastat při správné funkci neměl.



Obr. 56 Hlídní a měření teploty

Dalším blokem, který je zde uveden, je vývojový diagram hlídání teploty chladiče MOSFET tranzistorů. Událost je vyvolávána periodicky časovačem po 1s. Nejdříve se přečte teplota z digitálního čidla a ta je poté vyhodnocena. Pokud je teplota menší, než teplota

sepnutí ventilátoru, neděje se nic nebo se vypne ventilátor. V opačném případě se zase sepne ventilátor a při překročení maximální teploty se zátěž odpojí a vyhlásí alarm.



Obr. 57 Obsluha AD převodníku (Měření U, I, Uext)

Jako poslední je uveden vývojový diagram měření napětí na multiplexovaném vstupu AD převodníku (obr. 57). Po dokončení převodu se hodnota z převodníku uloží do bufferu ADC\_HODNOTA, přepne se vstup a opět se spustí ADC konverze. Po změření všech třech vstupů se data přepočítají na napětí a uloží se do přístupového bufferu, ze kterého mohou číst ostatní funkce.

### 6.3.3 Výpočty pro měření a nastavování zátěže

Pro získání vstupních veličin zátěže (parametrů zdroje) je nutno měřit napětí a proud na vstupu zátěže. Z nich se dají dále vypočítat další parametry jako např. odpor, kapacita, atd. Abychom získali skutečné hodnoty na vstupu, nestačí znát jenom napětí na vstupu AD převodníku, ale také převodní konstanty zesilovače měření proudu, útlum odporového děliče pro měření napětí, velikost odporu rezistoru pro měření proudu a hlavně u digitální části velikost referenčního napětí.

Pro získání velikosti napětí na vstupu AD převodníku lze využít následující vzorec:

$$U_{ADC} = \frac{ADC \cdot U_{REF}}{1024} \quad (V; -, V, -) \quad (6.1)$$

kde  $U_{ADC}$  je napětí zdroje na vstupu převodníku, ADC je digitální hodnota po převodu AD převodníkem vztažená k referenčnímu napětí  $U_{REF}$ . Konstanta 1024 ( $2^{10}$ ) vyjadřuje počet možných výstupních hodnot AD převodu (10bitový AD převodník).

Takto získané napětí je nutné dále přepočíst a to podle zapojeného vstupu. Chceme-li získat skutečnou vstupní hodnotu proudu na vstupu, použijeme následující vzorec:

$$I = \frac{U_{ADC}}{R_M \cdot G} = \frac{U_{ADC}}{G_I} \quad (A; V, \Omega, -; V, \Omega) \quad (6.2)$$



kde  $I$  je vstupní proud zátěže,  $U_{AD}$  napětí na vstupu AD převodníku.  $R_M$  je odpor měřicího rezistoru (v našem případě 25mΩ) a  $G$  je zesílení zesilovače. Protože jsou  $R_M$  a  $G$  konstanty, lze je schovat do jediné hodnoty  $G_I$ . Vzorec je odvozen ze zapojení konstantního proudu (obr. 19) uvedeného v kapitole 5.1.1.

Jak vyplývá ze simulačního schéma na obr. 25 v kapitole 5.2.1 napětí na vstupních svorkách zátěže se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$U = \frac{U_{ADC}}{K_U} + I \cdot R_M \quad (V; V, I, \Omega) \quad (6.3)$$

kde  $K_U$  je přenosová konstanta odporového děliče,  $I$  je proud tekoucí zátěží a  $R_M$  je měřicí rezistor. Vzhledem k malé velikosti hodnoty  $I \cdot R_M$  oproti poměru  $U_{ADC}/K_U$  lze  $I R_M$  zanedbat (za předpokladu že úbytek napětí na tranzistorech MOSFET je mnohem větší než na odporu). Odpor  $R_M$  je velikosti 25mΩ a při maximálním dovoleném proudu zátěže 10A na něm vznikne úbytek napětí max 250mV. Vztah po zanedbání  $I R_M$  má výslednou podobu:

$$U = \frac{U_{ADC}}{K_U} \quad (V; V, -) \quad (6.4)$$

Pokud chceme naopak nastavit určitou veličinu, musíme postupovat opačným způsobem. Nejdříve přepočítat požadované  $U$  nebo  $I$  na hodnot  $U_{ADC}$ , tedy vyjádřit si z výše uvedených rovnic potřebné napětí na vstupu AD převodníku ( $U_{ADC}$ ). Po tomto kroku je nutné přepočítat hodnotu na ADC pro DA převodník. Pro 12-ti bitový DA převodník platí následující vztah:

$$ADC = \frac{U_{ADC} \cdot 4096}{U_{REF}} \quad (-; V, -, V) \quad (6.5)$$

kde  $U_{ADC}$  je napětí zdroje požadované na výstupu převodníku,  $ADC$  je digitální hodnota pro převod vztažená k referenčnímu napětí  $U_{REF}$ . Konstanta 4096 ( $2^{12}$ ) vyjadřuje rozlišení převodníku.

Pokud chceme přístroj kalibrovat, musíme vypočíst převodní konstanty  $K_U$  a  $G_I$ . Pro tyto konstanty musíme znát velikost napětí na vstupu převodníku  $U_{ADC}$  a přesnou hodnotu  $I$  nebo  $U$  na vstupních svorkách přístroje. Převodní konstanty se vypočítají následovně:

$$K_U = \frac{U_{ADC}}{U} \quad (-; V, V) \quad (6.6)$$

a pro měření proudu:

$$G_I = \frac{U_{ADC}}{I} \quad (V/A; V, I) \quad (6.7)$$

Další výpočty, které zátěž využívá, jsou výpočty kapacity akumulátoru a vnitřní odpor zdroje. Kapacita akumulátoru se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$Q = I \cdot t \quad (Ah; A, h) \quad (6.8)$$

kde  $I$  je proud, kterým akumulátor vybíjíme a  $t$  je délka trvání doby vybíjení.

Vnitřní odpor zdroje podle vztahu:

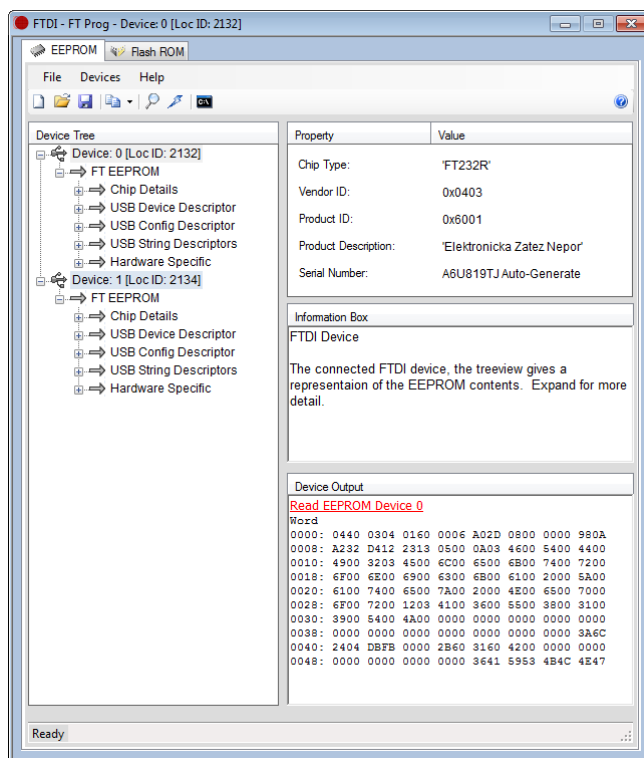
$$R_i = \frac{U_i - U}{I} \quad (\Omega; V, V, A) \quad (6.9)$$

kde  $U_i$  je hodnota napětí naprázdno a  $U$  je napětí zdroje při jeho zatížení proudem  $I$ .

### 6.3.4 Nastavení FT232R

Pro naprogramování procesoru je ještě nutné nastavit samotný obvod FT232R. K tomuto účelu slouží aplikace FT\_PROG.exe (obr. 58), která je volně dostupná ke stažení na stránkách firmy FTDI [24]. Navíc musí být v PC také nainstalovány ovladače D2XX pro tento obvod (také dostupné na stránkách FTDI [24]).

Po spuštění tohoto programu a otevření správného USB zařízení je nutné do kolonky ProductDescription napsat „Elektronicka Zatez Nepor“. Podle tohoto názvu se obslužný software zátěže připojuje k zařízení. Dále je nutné nastavit IO Controls C1 na RXLED# a C2 na TXLED# (signalizace LED RX/TX). Po nastavení a uložení těchto změn by se mělo jít k zařízení bez problému připojit.



Obr. 58 Program FT Prog

### 6.3.5 Manuální ovládání přístroje

Po zapnutí přístroje (tlačítko na zadním panelu zařízení) se nejprve zobrazí obrazovka s informacemi o elektronické zátěži a dojde ke krátkému rozsvícení všech diod, spuštění ventilátorů a doprovodnému zvukovému efektu. Po této inicializaci se zobrazí hlavní okno programu, kde máme na výběr buď režim zátěže, nebo kalibraci (obr. 59 vlevo). Pro pohyb v menu slouží červeně označené klávesy na klávesnici přístroje (viz. obr. 17). Tyto klávesy se aktivují stiskem tlačítka SHIFT a zobrazením textu SHIFT na spodním řádku displeje. Pro výběr požadované položky slouží šipky nahoru nebo dolů a aktivaci vybrané položky potvrdíme stiskem šipky doprava. V našem případě se tak dostaneme do menu „Rezim“ (obr. 59 vpravo).





Obr. 59 Hlavní menu (vlevo) a menu režimu (vpravo)

Po vybrání režimu zátěže „Konstantní U“ se zobrazí ono uvedené na obr. 60 vlevo. Hodnota  $U_n$  (nastavená) se zadá přímým stiskem požadovaných číselných kláves (nesmí být vidět text SHIFT) nebo otočením knoflíku HODNOTA. Veškeré nastavování se provádí v zobrazených jednotkách (v tomto případě v mV). Změřené napětí a proud jsou označeny jako  $U_m$  a  $I_m$ .

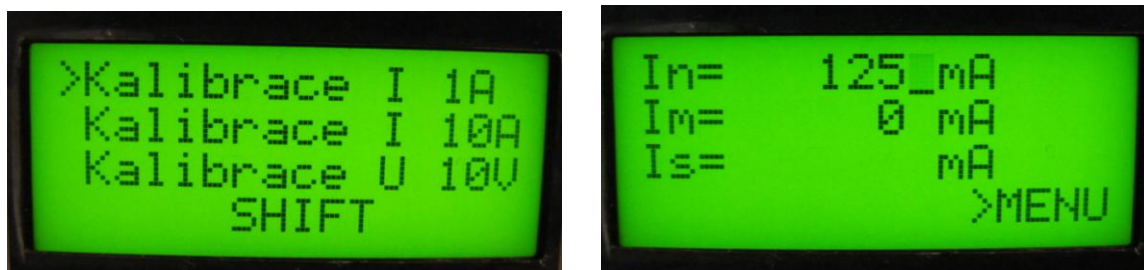
Pokud zmáčkneme tlačítko SHIFT a potom šipku doprava, zobrazí se menu nastavení režimu U. Zde si můžeme vybrat z nabídky nastavení vstupu (zapnout/vypnout), vrátit se zpět do měření nebo měření ukončit a vybrat si jiný režim z příslušného menu.



Obr. 60 Režim měření napětí (vlevo) a podmenu režimu napětí

Pohyb a nastavování v ostatních režimech a menu je principiálně stejný. Pokud nastane nějaká chyba (například překročení povoleného proudu nebo překročení maximální dovolené teploty), přístroj zapíská a rozsvítí se červená LED CHYBA. Taktéž přístroj ihned odpojí vstupní svorky. Na displeji se vypíše druh chyby a čeká se na zásah obsluhy.

Do kalibrace přístroje se dostaneme z hlavního menu výběrem položky „Nastavení“. Zobrazí se nám okno uvedené na obr. 61 vlevo. Zde si vybereme kalibraci rozsahu, který chceme upravit a opět potvrdíme. Jako  $I_n$  nastavíme kalibrační proud (obr. 61 vpravo), vstoupíme do podmenu kalibrace a zvolíme položku „Vstup ZAPNOUT“ (obr. 62) (u kalibrace napětí vstup nezapínáme). Počkáme, až se hodnota  $I_m$  změří a můžeme zadat skutečnou hodnotu  $I_s$ , kterou odečítáme ze sériově připojeného ampérmetru (nebo sériově připojeného voltmetru). Po zadání skutečné hodnoty vstoupíme opět do podmenu a zvolíme položku „Uložit“. Tím je kalibrace dokončena.



Obr. 61 Kalibrace – menu(vlevo) a nastavování kalibrace (vpravo)



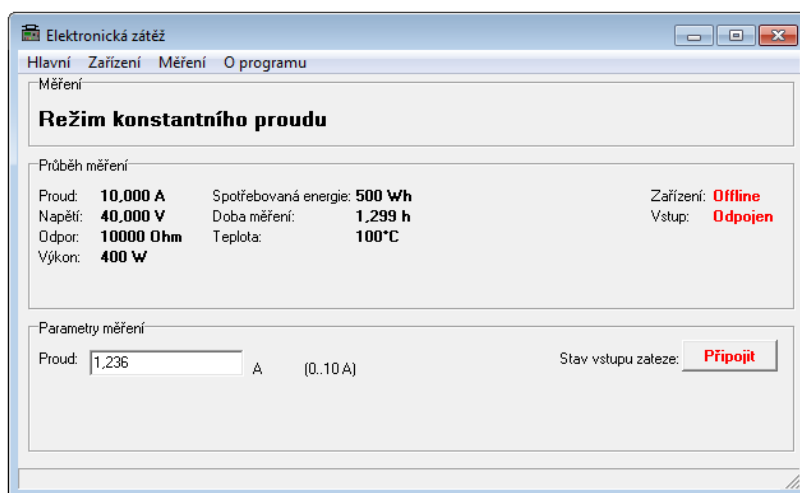
Obr. 62 Podmenu zvolené kalibrace

## 6.4 Aplikace pro OS Windows

Aplikace pro ovládání z PC je vytvořena v grafickém vývojovém prostředí C++Builder 6. Tento vývojový software kombinuje VCL a IDE napsané v Delphi s kompilátorem pro C++. Základem psaní zdrojového kódu je znalost komponent (tlačítka, menu,...), jejich vlastností a událostí, ze kterých se výsledná aplikace skládá. Programátor vyvíjí pouze exekutivní část kódu.

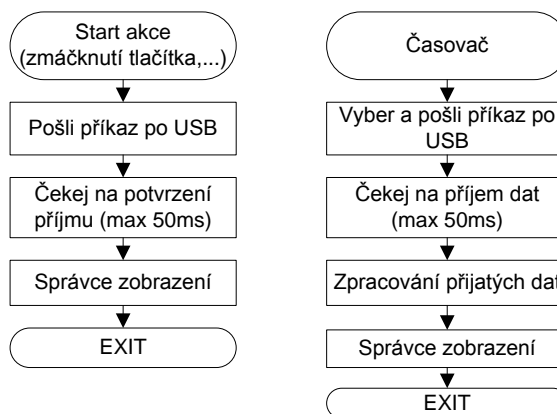
### 6.4.1 Vzhled a struktura programu

Na obr. 63 je vidět hlavní okno programu zátěže. Je tvořeno lištou menu a třemi základními bloky, informujícími o stavu měření. V menu lze možno elektronickou zátěž připojit, nastavit druh měření nebo kalibraci přístroje. V prvním bloku s názvem Měření se zobrazuje druh prováděné úlohy. Ve druhém bloku se zobrazuje stav zařízení a všechny změřené a vypočítané parametry. Poslední blok má funkci nastavovací a svůj vzhled mění podle nastaveného režimu.



Obr. 63 Hlavní okno programu

Na obr. 64 vlevo je znázorněn průběh programu, který je téměř stejný pro všechny nastavovací tlačítka programu. Po zmáčknutí tlačítka se okamžitě pošle příslušný příkaz po USB do elektronické zátěže. Pokud je doručen správně, zátěž okamžitě posílá potřebné data zpět do PC. Při správném příjmu se pokračuje dalším blokem a to správcem zobrazení, které nastaví příslušné prvky (měřené hodnoty, stav vstupu...). Pokud dojde k chybě, správce zobrazení je přeskočen. Tímto způsobem se zátěž jenom nastavuje.



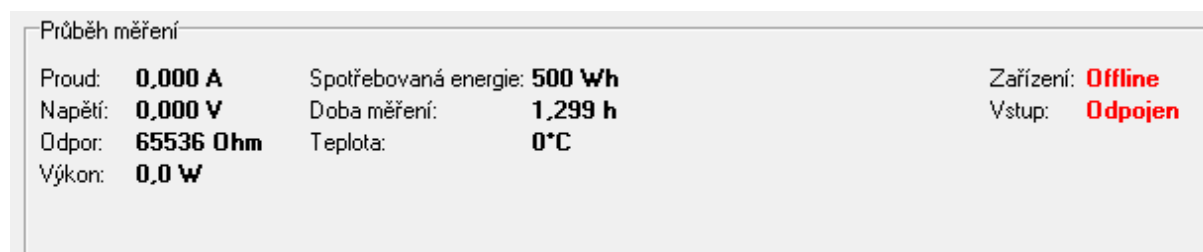
Obr. 64 Obsluha zmáčknutí tlačítka (vlevo) a časovače (vpravo)

Pro měření hodnot je využit časovač, jehož vývojový diagram je zobrazen na obr. 64 vpravo. Tento časovač postupně a periodicky vysílá příkazy měření hodnot vstupů (U, I, T,...) a kontroluje stav zátěže (ERROR,...). Časovač se opětovaně spouští po 50ms po ukončení svého předchozího cyklu. K dvojímu přístupu k zápisu do USB dojít nemůže (zmáčknutí tlačítka), protože při použití časovače se nejprve obslouží zrovna spuštěný cyklus (nebo obsluha komponenty) a až potom procesor obslouží volající komponentu. Časovač se spustí ihned po navázání spojení s přístrojem.

Posledními prvky, kterými zátěž můžeme nastavit, jsou editovací textová pole. U nich je navíc blok testování zadání správného formátu čísla mezních limitů nastavení hodnoty čísla. Při špatném zadání formátu se program vrací zpět do zadávání čísla.

#### 6.4.2 Ovládání aplikace

Aplikaci spustíme otevřením souboru se jménem „Elektronická zátěž.exe“. Nejprve je nutné se zátěží navázat kontakt (*Zařízení > Najít zařízení*). Pokud je spojení úspěšně navázáno, přepíše se červený text z „Offline“ na zelený „Online“. V tomto režimu je zátěž nastavitelná pouze z tohoto softwaru. Všechny fyzické ovládací prvky na přístroji jsou odpojeny. Dále je nutné nastavit požadovaný režim zátěže (*Měření > Režim konstantního proudu*). A nakonec v bloku parametry měření připojíme vstup zátěže (tl. *Připojit*) a do editačního pole zapíšeme požadovanou hodnotu proudu. V bloku „*Průběh měření*“ obr. 65 odečteme požadovanou veličinu.



Obr. 65 Blok průběhu měření

Vlivem stárnutí součástek dochází k mírnému rozhození parametrů zátěže. Abychom tomuto předešli, je dobré přístroj čas od času kalibrovat. K tomuto účelu slouží blok *Kalibrace* (*Zařízení > Kalibrace přístroje*) (obr. 66). V rolovacím menu vybereme druh kalibrace, nastavíme požadovanou hodnotu např. proudu (1A), připojíme vstup zátěže (tl. *Připojit*) a zadáme skutečnou hodnotu proudu, který zátěží protéká. Tuto hodnotu je nutné měřit externím přístrojem zapojeným do obvodu sériově nebo paralelně. Po zadání přesné hodnoty zmáčkne tlačítko *zkalibrovat* a přístroj si sám vypočte a uloží novou kalibrační konstantu.

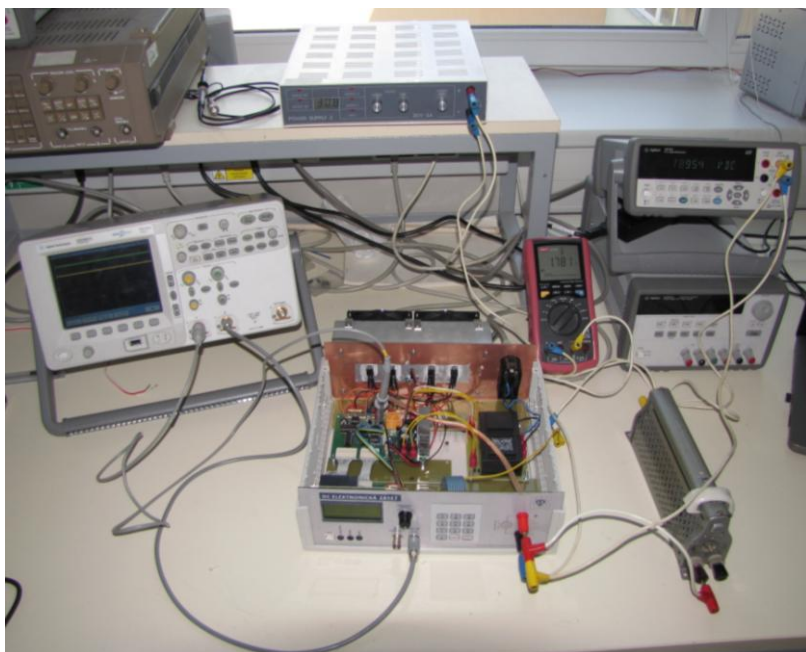
Kalibrace			
Kalibrace:	Nastavená hodnota:	Skutečná hodnota:	
I (rozsah 1A)	1,000 A	0,768 A	
			<b>Připojit</b>
			<b>Zkalibrovat</b>

Obr. 66 Kalibrace přístroje

Přístroj vrátíme do původního manuálního režimu zavřením okna aplikace, nebo odpojením pomocí menu (*Zařízení > Odpojit zařízení*). Taktéž jej lze odpojit restartováním přístroje.

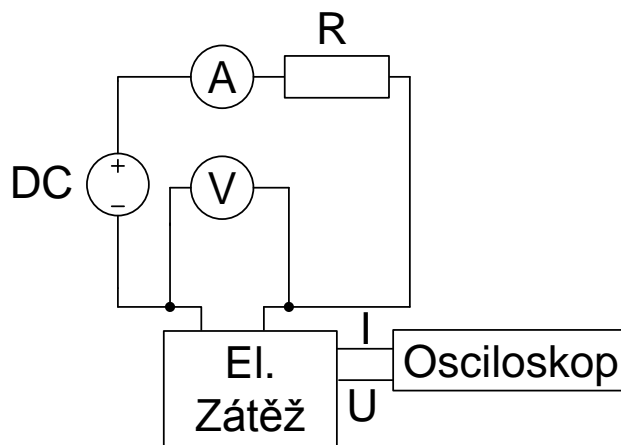
## 7 Měření a srovnání parametrů zátěže

Ověřování parametrů elektronické zátěže neproběhlo na úplně odladěném přístroji. Největší problém je se stabilizací a nastavením analogové části přístroje, která se neustále rozkmitává a značně ovlivňuje měření. V extrémních případech došlo i krušení digitální části přístroje. Některé parametry se přesto podařili změřit či ověřit.



Obr. 67 Měření parametrů zátěže - pracoviště

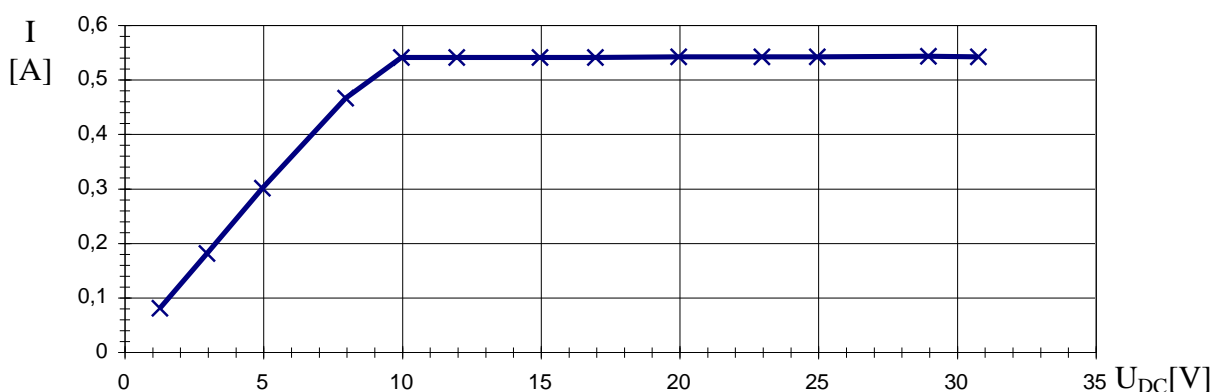
Na obr. 67 je zobrazeno celé měřicí pracoviště. Pro měření byly použity přístroje osciloskop (vlevo), DC napájecí zdroj (nahore uprostřed), ruční multimetr (jako ampérmetr), stolní multimetr (jako voltmetr) a reostat o hodnotě  $18\ \Omega$  pro omezení maximálního proudu při případné chybě přístroje. Osciloskopem byl snímán proud na předním výstupu zátěže ( $I_{\text{zátěž}}$ ) a velikost napětí na vstupních svorkách zátěže. Napětí DC zdroje bylo možné regulovat v rozmezí 1,2 - 30,8V. Skutečné napětí na zátěži se však vlivem vloženého odporu se vrůstajícím proudem mění. Celkové schéma zapojení je vidět na obr. 68.



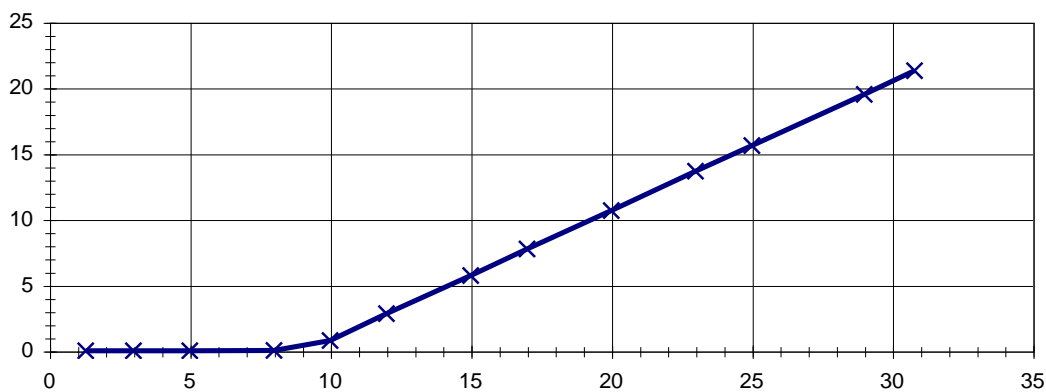
Obr. 68 Schéma zapojení měření

## 7.1 Režim konstantního proudu

V tomto režimu bylo možné otestovat vliv změny napětí DC zdroje na nastavenou konstantní hodnotu proudu zátěže. Nastavená hodnota proudu byla 0,54A. Výsledná křivka je vidět na obr. 69. Výrazný zlom nastává při napětí  $U_{DC} = 10V$ . Pod tímto napětím je úbytek na srážecím rezistoru příliš velký a nedovolí zdroji dodat do zátěže požadovaný proud. Hodnota, při které zátěž ztratila schopnost udržet požadovaný proud lze vyčíst z grafu na obr. 70. Zde je zobrazeno přímé napětí na svorkách elektronické zátěže. Dolní mezní hodnota napětí pro konstantní proud je tedy 1V.

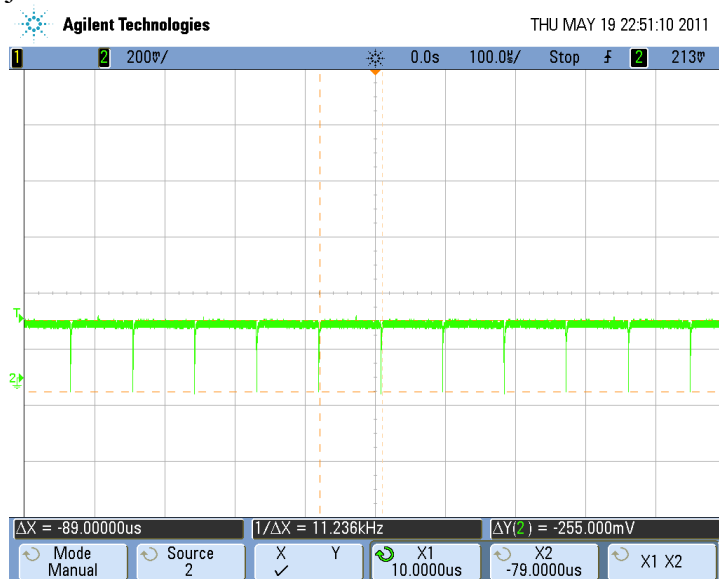


Obr. 69 Vliv změny napětí zdroje na udržení konstantní hodnoty proudu



Obr. 70 Vliv změny napětí zdroje na napětí za srážecím odporem

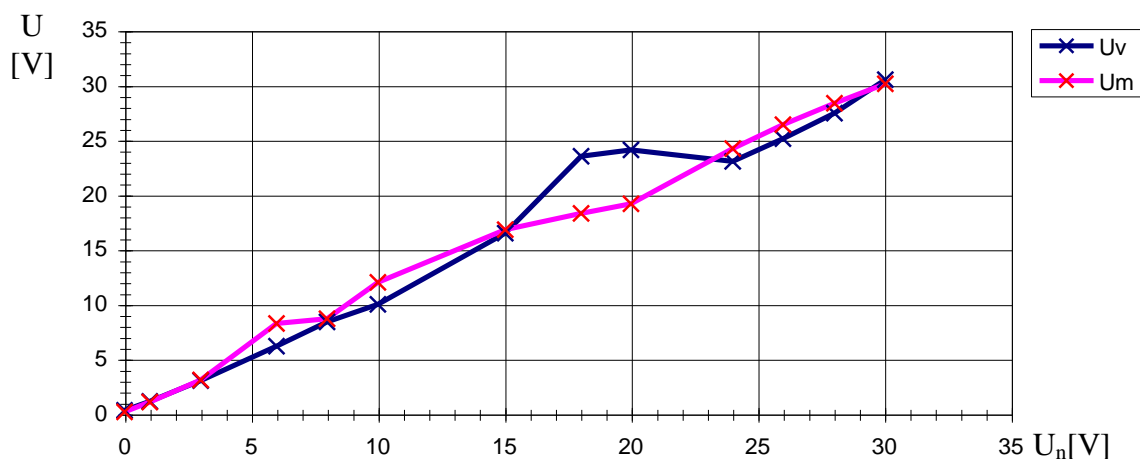
Na obr. 71 vidíme průběh signálu na proudovém výstupu přístroje. Lze zde vidět pravidelné zákmity s opakující se frekvencí 11,236kHz a výšce zákmitu 255mV. Toto rušení se na měření veličin nijak zvlášť neprojeví, neboť trvá jen maximálně jednotky us. Při vyšším proudu byla situace horší (viz. např. obr. 77), a nebylo možno pořádně změřit vstupní veličiny testovaného přístroje.



Obr. 71 Rušení v režimu konstantního proudu

## 7.2 Režim konstantního napětí

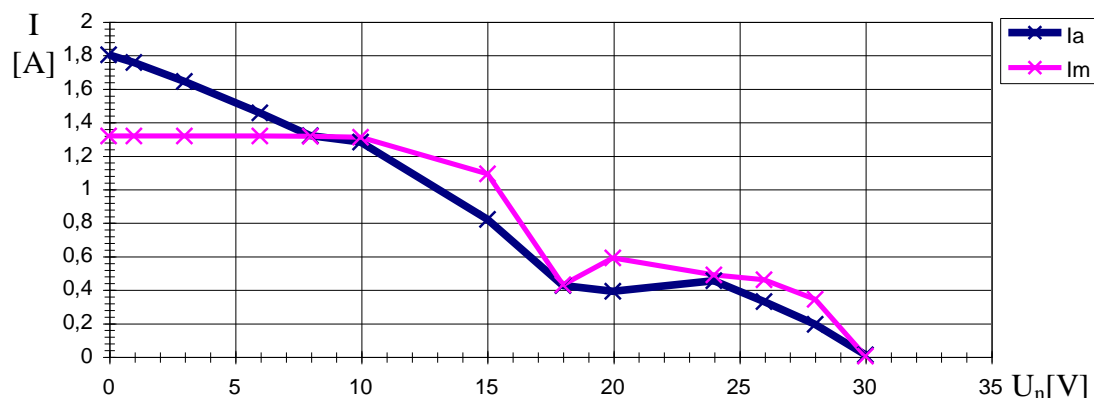
V tomto režimu bylo možno změřit nejvíce křivek pro srovnání se simulací zátěže v programu Orcad. Na obr. 72 vidíme přenosovou charakteristiku přístroje  $U = f(U_n)$ .  $U_n$  je požadované napětí nastavené na elektronické zátěži a hodnoty  $U_m$  (měření zátěže) a  $U_v$  (měření externím voltmetrem) jsou změřené hodnoty na vlastních svorkách přístroje. Z grafu vyplývá, že si jsou hodnoty velmi blízké. V části okolo  $U_n = 20V$  je rozdíl nejpatrnější. Způsobilo to velmi silné rozkmitání přístroje.



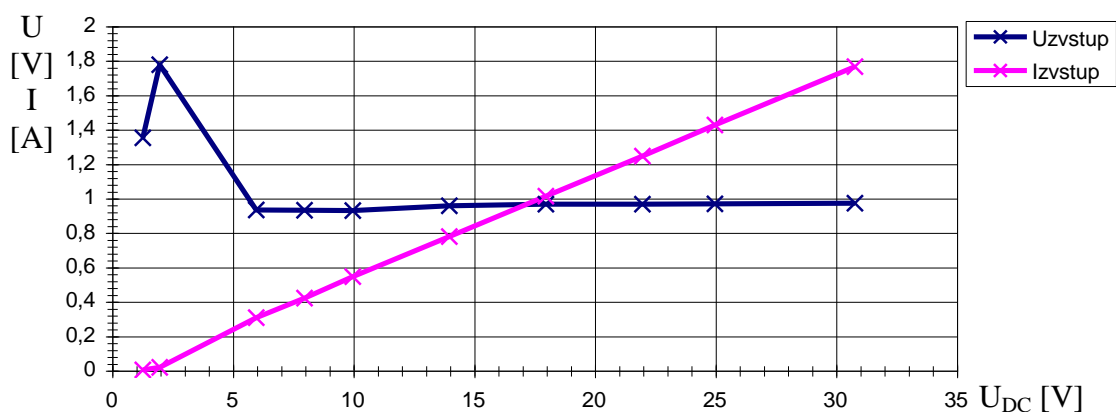
Obr. 72 Přenosová charakteristika  $U_{v,m}=f(U_n)$

V dalším grafu (obr. 72) je změřena závislost vstupního proudu zátěže na nastaveném požadovaném napětí  $U_n$ .  $I_a$  je proud změřený ampérmetrem a  $I_m$  je proud změřený zátěží. Křivka  $I_a$  je pod 10V omezena z důvodu softwarové chyby (nepřepnutí do vyššího rozsahu) a omezením napětí na ochranné zenerově diodě (na vstupu AD převodníku). Maximální proud který protekl zátěží byl 1,8A. Ideálně by měli být obě křivky lineární.

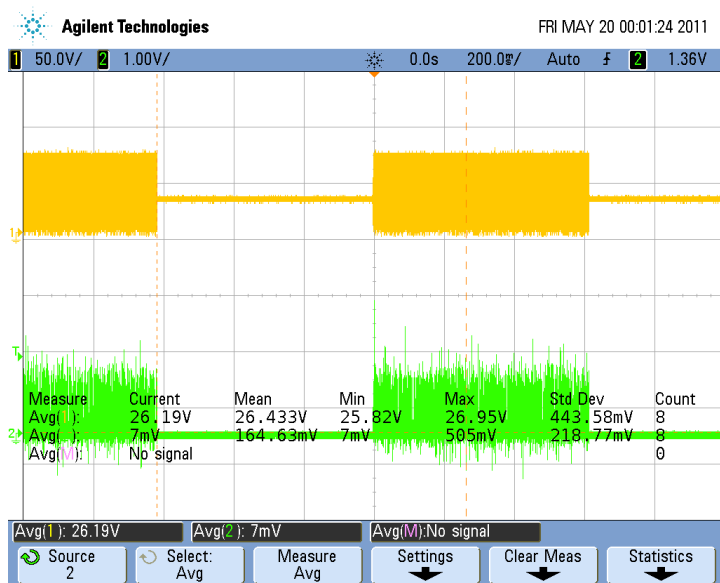


Obr. 73 Přenosová charakteristika  $I=f(U_n)$ 

Na posledním grafu (obr. 74) režimu konstantního proudu vidíme testování schopnosti zátěže udržet nastavené konstantní napětí při změně napětí na zdroji. Nastavené napětí bylo 1,430 V. V grafu lze vyčíst, že se hodnota držela na hodnotě 0,97 V. V této oblasti má zátěž horší rozlišovací schopnost a proto hodnoty jsou odlišné. Zátěž držela konstantní napětí až do hodnoty přibližně 6 V (směrem od nejvyššího napětí  $U_{DC}$  dolů).



Obr. 74 Vliv změny napětí zdroje na vstupní parametry zátěže

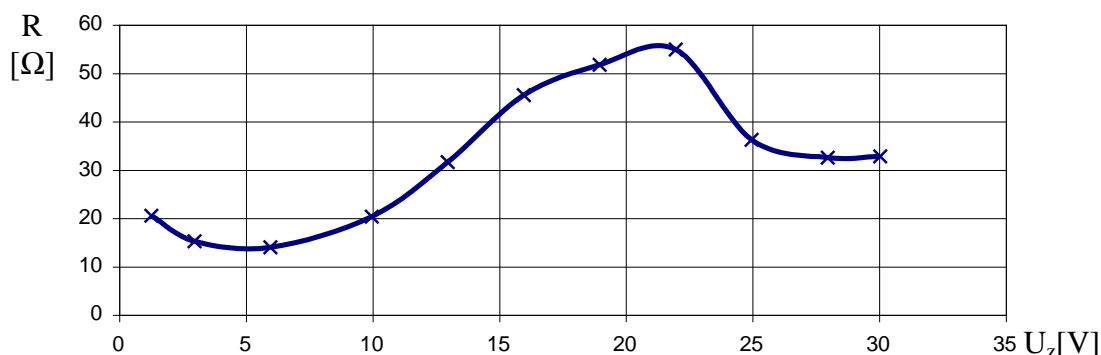


Obr. 75 Test stability při skokové změně nastavovacího napětí

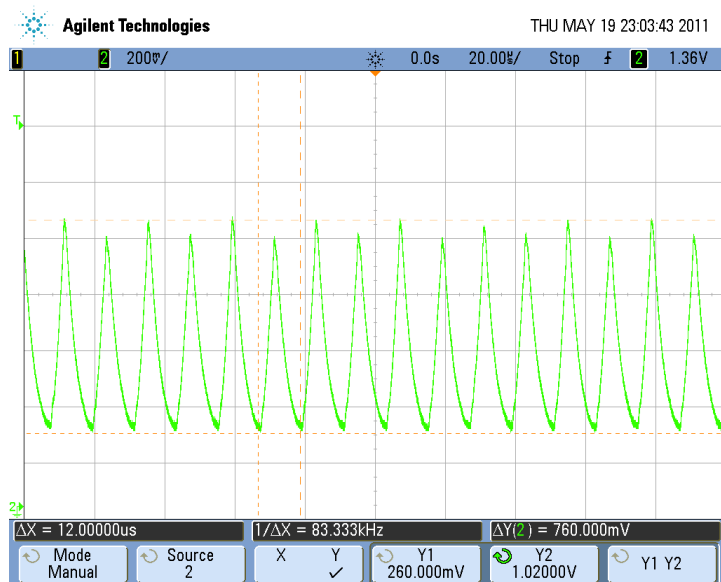
Se zátěží byl vyzkoušen také pokus o změření doby ustálení při skokové změně nastavovacího napětí. Byly nastaveny dvě nenulové hodnoty napětí (27V a 5V), které měly dobu trvání 600ms. Na hodnotě 27 V se zátěž dokázala ustálit, na druhé už ne a rozkmitala se. Výsledný pokus je zachycen na obr. 75. Na žlutém průběhu je zachyceno napětí na vstupních svorkách přístroje a na zeleném průběhu signál proudu z výstupu měření proudu el. zátěže. Výsledné průběhy jsou velmi podobné průběhům ze simulace při zvolení špatné kompenzační kapacity  $C_1$  (viz. obr. 12).

### 7.3 Režim konstantního odporu

Ze všech uvedených režimů skončil režim konstantního odporu nejhůř. Byla snaha změřit vliv změny vstupního napětí  $U_{DC}$  na konstantní nastavenou hodnotu odporu a to 91%. Výsledek je zobrazen na následujícím obrázku (obr. 76). Ideálně by měla být křivka vodorovná. Díky silnému rozkmitání zátěže (obr. 77) o frekvenci 83kHz a rozkmitu hodnot v řádu stovek mV má graf průběh zcela odlišný a náhodný.



Obr. 76 Vliv změny napětí zdroje na nastavenou hodnotu odporu



Obr. 77 Nežádoucí kmitání na proudovém výstupu

### 7.4 Srovnání měření se simulací

Při srovnání naměřených průběhů a hodnot s teoretickými výsledky, které jsme získali simulací v programu Orcad v kapitole 5 lze vyvodit závěr, že zátěž přibližně odpovídá očekávaným nasimulovaným parametrům. Pro přesnější srovnání by bylo potřeba zátěž



pořádně doladit a nastavit, aby nedocházelo k jejímu rozkmitání a rušení měřených veličin. Nejvíce se simulace shodovala s teoretickým očekáváním v režimu konstantního napětí, pro který bylo změřeno nejvíce křivek. Dále s proudovým režimem a odporový režim se neshodoval kvůli silnému kmitání s teoretickými předpoklady vůbec.

## Závěr

V této diplomové práci byla probrána základní problematika týkající se principu, návrhu a konstrukce elektronických zátěží. Byly popsány principy jak prvních vytvářených zátěží pomocí rezistorů a reostatů, tak i polovodičových a nakonec i mikroprocesorových zátěží. U mikroprocesorových zátěží byly popsány jednotlivé bloky, které mohou zátěže obsahovat. Národním příkladem má být zde uvedené blokové schéma (obr. 8) [2] již existujícího výrobku, který je řízen mikroprocesorem a komunikuje s rozhraním USB. Jsou zde popsány základní poznatky o tomto rozhraní a možné způsoby implementace do procesoru. V práci je rovněž uveden průzkum trhu s elektronickými zátěžemi. Je zde popsáno jaké zátěže se vyrábějí, jaké mají vybavení, co všechno jsou schopny měřit a jejich přibližné základní parametry.

Další část práce se zabývala především návrhem vlastní konstrukce zátěže s ověřením klíčových parametrů zapojení simulací. Vlastní konstrukce zátěže spočívá v propojení analogové zátěže s digitálním 8bitovým procesorem ATmega128A-AU. Simulací byla podrobena hlavní klíčová analogová část zátěže a byly otestovány všechny tři režimy zátěže (režim konstantního proudu, napětí a odporu) a byla potvrzena teoretická funkčnost zapojení. Taktéž byly určeny přibližné dosažitelné parametry a problémy, které mohou v zátěži nastat.

V poslední fázi diplomové práce byl vytvořen řídicí program pro ovládací mikroprocesor zátěže a taktéž software pro ovládání přístroje z PC pomocí sběrnice USB. Bylo seskládáno a částečně oživeno samotné zařízení. Zátěž z principiálního hlediska funguje, ale je nutné ji doladit a stabilizovat, aby nedocházelo k nežádoucímu rozkmitání a zhoršení funkce celého přístroje. Toho se z časových důvodů nepodařilo docílit.

## Použitá literatura

Při zpracování projektu byly využity následující publikace a zdroje informací:

- [1] KREJČÍŘÍK, Antonín. *Napájecí zdroje I*. Praha: BEN – technická literatura, 1999. 352 s. ISBN 80-86056-02-3.
- [2] STRAŠIL, Ivan. Přesná elektronická zátěž. *Praktická elektronika*. 2008, ročník XIII, č. 5, s. 14-19.
- [3] BEČKA, R. Elektronická zátěž. *Praktická elektronika*. 1996, ročník I, č.5, str. 9-11.
- [4] FRÝZA, Tomáš; FEDRA, Zbyněk; ŠEBESTA, Jiří. *Mikroprocesorová technika – laboratorní cvičení*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.
- [5] VRBA, Kamil; HANÁK, Pavel. *Vzájemný převod analogových a digitálních signálů*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [6] Strašil elektronika. Oficiální stránka firmy EGMedical, spol. s r.o. [online]. 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://www.strasil.net/index.php?text=zatez>
- [7] H TEST. Oficiální stránka firmy H TEST a.s. [online]. 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://www.htest.cz//index.php?kategorie2=36>
- [8] TR Instruments. Oficiální stránka firmy TR Instruments spol. s r.o. [online]. 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: [www.trinstruments.cz](http://www.trinstruments.cz)
- [9] MEATEST. Oficiální stránka firmy MEATEST [online]. 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: [www.meatest.cz](http://www.meatest.cz)
- [10] ASIX. Oficiální stránka firmy ASIX s.r.o. [online]. 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: [www.asix.cz](http://www.asix.cz)
- [11] Elektronická zátěž. Web zabývající se elektronikou. [online]. 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: [www.danyk.wz.cz/zatez.html](http://www.danyk.wz.cz/zatez.html)
- [12] COUFAL, Tomáš. Softwarová implementace USB rozhraní do mikrokontrolérů Atmel. *HW server s.r.o.* [online]. 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://hw.cz/teorie-praxe/art1953-softwarova-implementace-usb-pro-mikrokontrolery-avr.html>
- [13] Pandatron. Malý webový server. *Pandatron* [online]. 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: [http://pandatron.cz/?171&maly\\_webovy\\_server](http://pandatron.cz/?171&maly_webovy_server)
- [14] Redakce HW serveru. USB rozhraní. *HW server s.r.o.* [online]. 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART327-USB---Universal-Serial-Bus---Popis-rozhrani.html>
- [15] ŠPAČEK, Milan. Elektronická zátěž. *TOSI* [online]. 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://www.tosi.cz/elektro.html>
- [16] Elektronika.cz. Elektronická zátěž. *Elektronika.cz* [online]. 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://www.elektronikacz.borec.cz/Data/Elektronicka%20zatez%202.htm>
- [17] Reostat. *Wikipedia: Internetová encyklopedie* 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Reostat>

- [18] Atmel Corporation. Oficiální stránka firmy Atmel. [online]. 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://www.atmel.com/>
- [19] Atmel Corporation. 8-bit Microcontroller ATmega16[online]. 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc8154.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8154.pdf)
- [20] MATOUŠEK, David. *USB prakticky s obvody FTDI – I. díl*. Praha: BEN – technická literatura, 2003. 272 s. ISBN 80-7300-103-9.
- [21] TT klávesnice, a.s. Aplikační katalogové listy klávesnice TS 52361566157. [cit. 18. prosince 2010]. Dostupné na WWW: [http://www.ttklavesnice.cz/cs/soubory/TS\\_523\\_6156\\_6157.pdf](http://www.ttklavesnice.cz/cs/soubory/TS_523_6156_6157.pdf)
- [22] Atmel Corporation. 8-bit Microcontroller ATmega128A[online]. 2010 - [cit. 18. prosince 2010]. Dostupné na WWW: [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc8151.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8151.pdf)
- [23] VOJÁČEK, Antonín. Integrované senzory proudu a problematika použití-1.část. *HW server s.r.o.* [online]. 2009 - [cit. 6. dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://automatizace.hw.cz/integrované-senzory-proudu-a-problematika-pouziti-1cast>
- [24] FTDI Chip. Oficiální stránka firmy FTDI Chip. [cit. 18. prosince 2010]. Dostupné na WWW: <http://www.ftdichip.com/>
- [25] Objective development. Virtual USB port for AVR microcontrollers. [cit. 18. prosince 2010] <http://www.obdev.at/products/vusb/index.html>
- [26] ALPS Europe Distribution. Aplikační a katalogové listy rotačního encoderu EC12E24242A2. 2006 - [cit. 18. prosince 2010]. Dostupné na WWW: <http://www.farnell.com/datasheets/5210.pdf>
- [27] FTDI Chip. Aplikační a katalogové listy obvodu FT245R. 2010 - [cit. 18. prosince 2010]. Dostupné na WWW: [http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT245R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT245R.pdf)

## Seznam použitých zkratk veličin a symbolů

### Zkratky

<b>Zkratka</b>	<b>Název</b>
USB	Universal Serial Bus
FTDI	Future Technology Devices International
AC	Střídavý proud
DC	Stejnoseměrný proud
D/A	Převodník digitálního signálu na analogový
A/D	Převodník analogového signálu na číslicový
MOSFET	Tranzistor řízený elektrickým polem
PC	Personal Computer
μPC	Mikroprocesorová jednotka
USART	Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter
LCD	Liquid crystal display
LED	Light-emitting diode
1-Wire	1-vodičová datová sběrnice (Dallas Semiconductor)
FLASH	Nevolatile elektricky programovatelná paměť
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
SRAM	Static Random Access Memory
PWM	Pulse Width Modulation
NPN	Označení bipolárního tranzistoru
RS232	Sériové rozhraní
RS485	Sériové rozhraní
IEEE488 (GPIB)	Sběrnice pro připojení měřicích přístrojů (HP)
SPI	Serial Peripheral Interface
VID	Číselný identifikátor výrobce (USB)
PID	Číselný identifikátor výrobku (USB)
VCP	Virtual COM Port
D2XX	Přímé ovladače FT232R pro operační systém
I/O	Input/Output
COM	Komunikační port
GNU GPL	General Public License
TTL	Transistor-transistor-logic
DC/DC	Konvertor stejnosměrného napětí na stejnosměrné
AC/DC	Konvertor střídavého napětí na stejnosměrné
VEE	Grafické vývojové prostředí
DPS	Deska Plošných Spojů
OS	Operační systém
VCL	Visual Component Library
IDE	Integrated Development Environment

## Symbols

Symbol	Název	Jednotka
U	Elektrické napětí	V
V	Elektrické napětí (značení PSpice)	V
I	Elektrický proud	A
R	Elektrický odpor	$\Omega$
P	Elektrický výkon	W
V <sub>ref</sub>	Referenční napětí	V
C	Kapacita	F
L	Indukčnost	H
V <sub>IN</sub>	Řídící napětí zátěže	V
U <sub>ZATEZ</sub>	Napětí zatěžovaného zdroje	V
p	Přesnost ustálení	%
SET	Poměrné nastavení potenciometru	-
K	Přenos zesilovače (děliče)	-

## Seznam příloh

**Příloha č. 1: Celkové schéma elektronické zátěže**

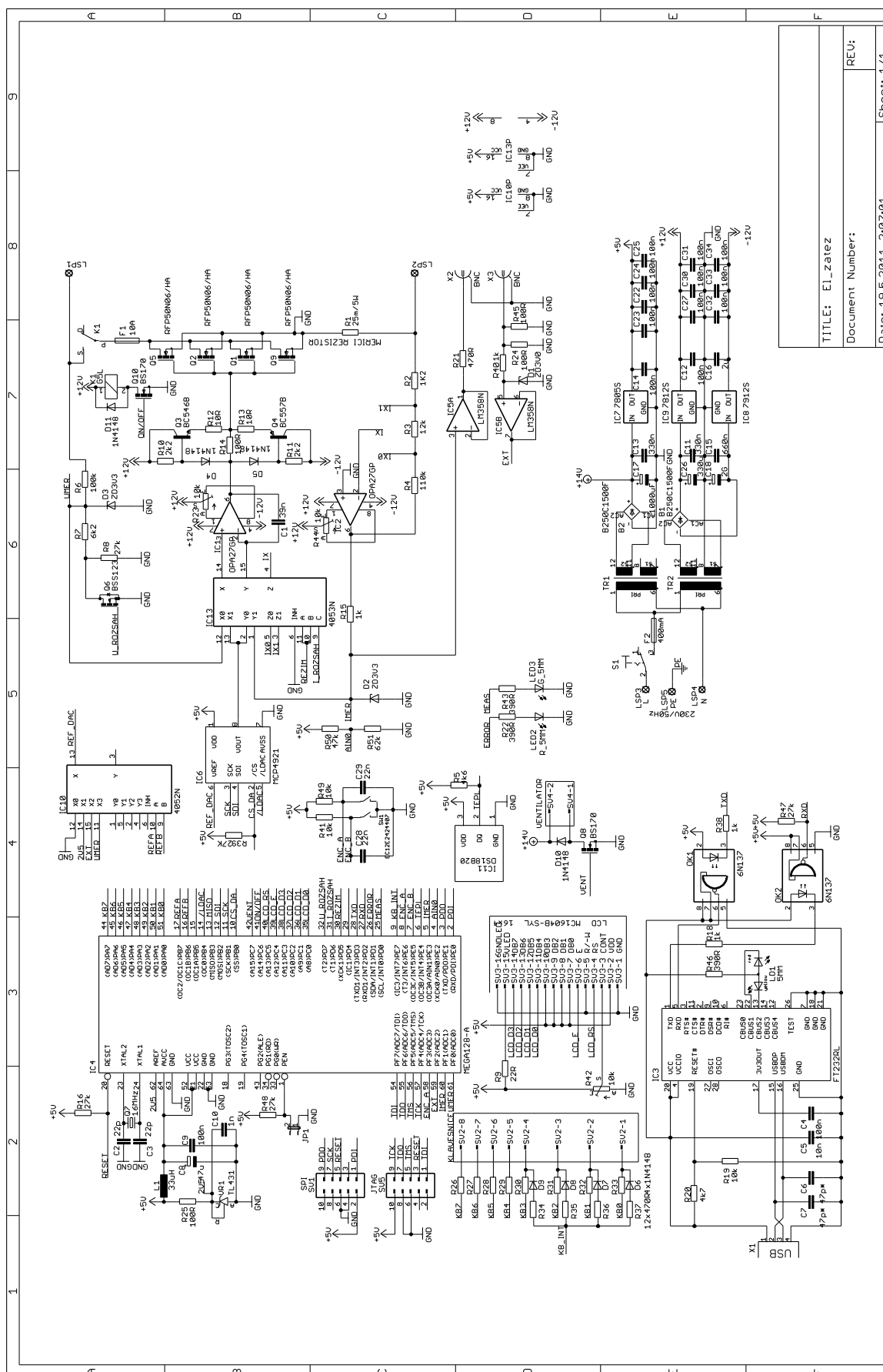
**Příloha č. 2: Seznam součástek**

**Příloha č. 3: Přední panel**

**Příloha č. 4: Přední panel - rozměry**

**Příloha č. 5: Zadní panel - rozměry**

## Příloha č. 1: Celkové schéma elektronické zátěže



TITLE: E1\_zatez

Document Number:

Date: 19.5.2011 2:07:01

REU:

Sheet: 1/1

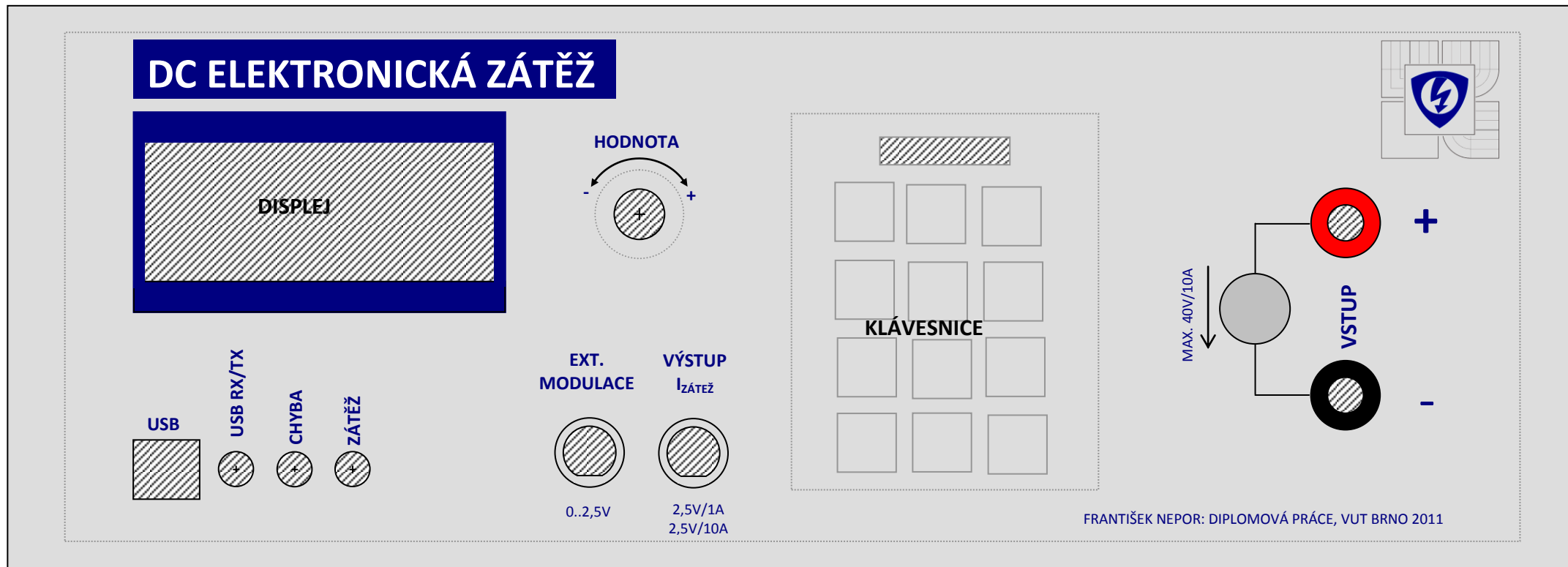
**Příloha č. 2: Seznam součástek****Tabulka 4: Seznam součástek**


Seznam součástek		
Součástky	Hodnota	Poznámky
Odpory		
R <sub>1</sub>	25mΩ/5W	PWR4412-2S (Bourns), měřicí rezistor
R <sub>2</sub>	1k2	
R <sub>3</sub>	12k	
R <sub>4</sub>	110k	
R <sub>6</sub>	100k	
R <sub>7</sub>	6k2	
R <sub>8,16,39,47,48</sub>	27k	
R <sub>9</sub>	22R	
R <sub>10,11</sub>	2k2	
R <sub>12,13</sub>	10R	
R <sub>14,24,25,45</sub>	100R	
R <sub>15,18,38,40</sub>	1k	
R <sub>19,23,41,42,44,49</sub>	10k	
R <sub>20</sub>	4k7	
R <sub>21,26-37</sub>	470R	
R <sub>22,43,46</sub>	390R	
R <sub>50</sub>	47k	
R <sub>51</sub>	62k	
Kondenzátory		
C <sub>1</sub>	39n	keramický
C <sub>2,3</sub>	22p	
C <sub>4,9,12,14,22-25,27,30-34</sub>	100n	
C <sub>16</sub>	2u	
C <sub>5</sub>	10n	
C <sub>6,7</sub>	47p	
C <sub>8</sub>	47μ	
C <sub>18</sub>	2G	
C <sub>10</sub>	1n	
C <sub>11,13,15,19</sub>	330n	
C <sub>17</sub>	1000μ	
C <sub>20,21</sub>	470μ	
C <sub>26</sub>	220μ	
C <sub>28,29</sub>	22n	
Indukčnost		
L <sub>1</sub>	33uH	
Diody, diodové můstky, LED		
D <sub>1</sub>	3V0	Zenerova dioda
D <sub>2,3</sub>	3V3	Zenerova dioda
D <sub>4-11</sub>	1N4148	
B <sub>1,2</sub>	B250C1500F	Diodový můstek 250V/800V 2A
LED <sub>1</sub>	5mm/DUO	Dvoubarevná LED červená/zelená
LED <sub>2</sub>	5mm/RED	
LED <sub>3</sub>	5mm/GREEN	
Tranzistory		

Q <sub>1,2,5,9</sub> Q <sub>3</sub> Q <sub>4</sub> Q <sub>6,8,10</sub>	RFP50N06/HA BC546B BC557B BS170	MOSFET tranzistor 131W 60V 50A 22mΩ NPN 65V 0,1A 0,5W PNP 45V 0,1A 0,5W N-MOSFET 60V 0,3A 0,83W 5Ω
Integrované obvody		
IC <sub>1,2</sub> IC <sub>3</sub> IC <sub>4</sub> IC <sub>5</sub> IC <sub>7</sub> IC <sub>8</sub> IC <sub>9</sub> IC <sub>10</sub> IC <sub>11</sub> IC <sub>13</sub> VR <sub>1</sub> OK <sub>1,2</sub>	OPA27GP FT232RL ATmega128A-AU LM358N 7805S 7912S 7812S 4052N DS18B20 4053N TL431 6N137	Operační zesilovač Převodník USB ↔ USART Procesor Operační zesilovač Stabilizátor 5V Stabilizátor -12 Stabilizátor 12V Elektronický přepínač Teplotní čidlo Elektronický přepínač Zdroj referenčního napětí Optocoupler
Konektory a přepínače		
LSP <sub>1-5</sub> JP <sub>1</sub> S <sub>1</sub> SV <sub>1,5</sub> SV <sub>2</sub> SV <sub>3</sub> SV <sub>4</sub> SW <sub>1</sub> X <sub>1</sub> X <sub>2,3</sub>	LSP10 Jumper Switch ML10 L08P L18P L02P EC12E2424407 PN61729 BNC Z 50	Mechanický rotační encoder USB konektor B BNC zásuvka do panelu
Ostatní součástky		
F <sub>1</sub> F <sub>2</sub> Q <sub>7</sub> K <sub>1</sub> TR <sub>1</sub> TR <sub>2</sub> Klávesnice Displej Síťový konektor Ventilátor Výstupní svorky Konstrukční krabice	10A/SH22,5 400mA/SH22,5 16MHz/mini RELRA S1215 230/2x9V 10VA 230/2x12V 10VA TS 523 6157 MC1604B-SYL	Krystal Relé 12V 15A 250VAC 400R  3x4 kláves, fóliová 4x16 znaků

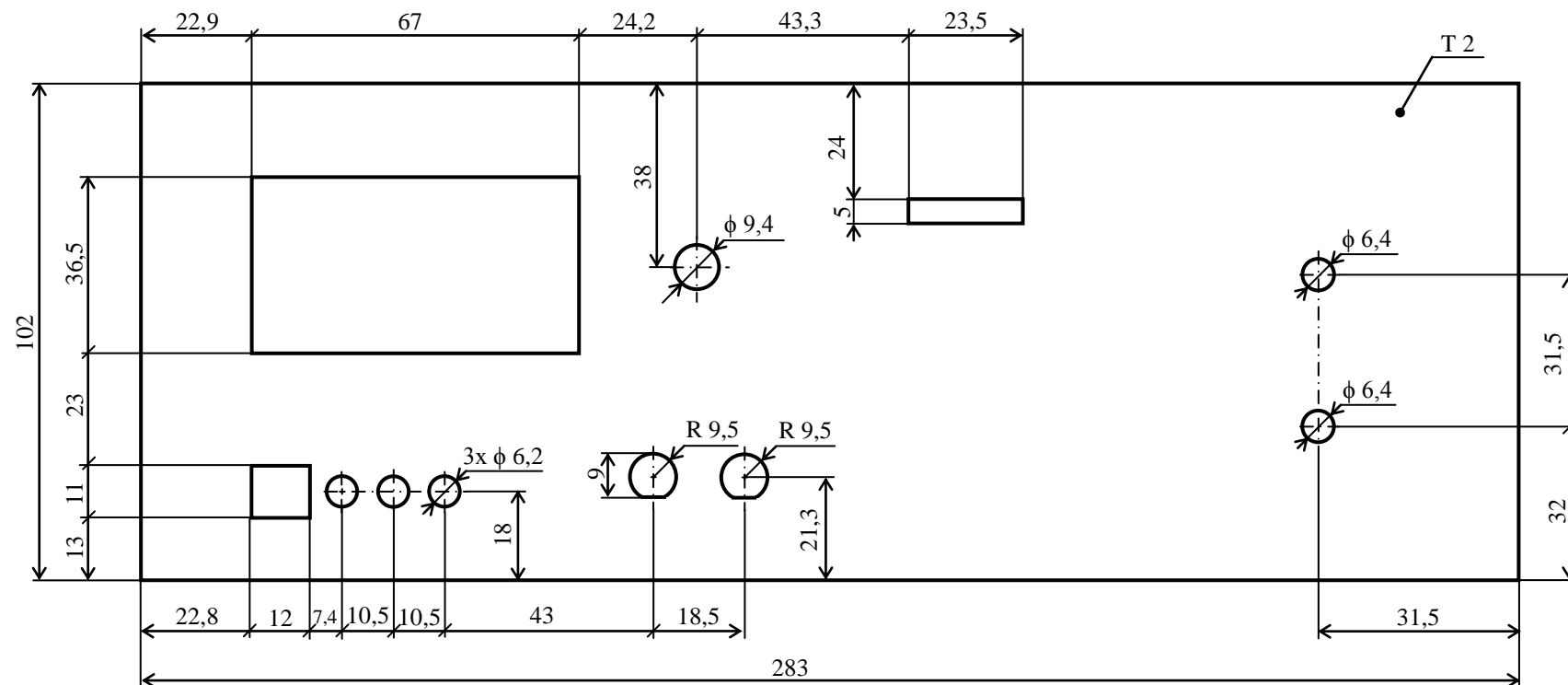


### Příloha č. 3: Přední panel



 - Vyříznuté plochy

#### Příloha č. 4: Přední panel - rozměry



## Příloha č. 5: Zadní panel - rozměry

